УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Настасија Д. Николић

РАЗВОЈ МОДЕЛА ЗА УНАПРЕЂЕЊЕ LEAN ИНДУСТРИЈСКИХ СИСТЕМА ПРИМЕНОМ НАПРЕДНИХ РОБОТСКИХ РЕШЕЊА

докторска дисертација

Крагујевац, 2026



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC
FACULTY OF ENGINEERING

Nastasija D. Nikolić

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR THE IMPROVEMENT OF LEAN INDUSTRIAL SYSTEMS USING ADVANCED ROBOT SOLUTIONS

Doctoral Dissertation

Kragujevac, 2026

Идентификациона страница докторске дисертације

Аутор
Име и презиме: Настасија Д. Николић
Датум и место рођења: 29.12.1994. Крагујевац, Србија
Садашње запослење: Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Докторска дисертација
Наслов: Развој модела за унапређење *Lean* индустријских система применом напредних роботских решења
Број страница: 136
Број слика: 42
Број библиографских података: 224
Установа и место где је рад израђен: Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Научна област: Индустријско инжењерство и инжењерски менаџмент
УДК: 007.51:331.45(043.3)
Ментор:
др Марко Ђапан, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Број и датум одлуке Већа универзитета о прихватању теме докторске дисертације:
IV-04-173/5 од 21.03.2023.

Апстракт

Lean индустријски системи послују на турбулентним тржиштима где повећање продуктивности и флексибилности постаје императив, уз истовремено ограничење ресурса. *Lean* индустријским системи могу унапредити своје процесе имплемнтацијом напредних роботских решења.

Предмет истраживања ове докторске дисертације је развој агилног модела за имплементацију роботских решења у *Lean* индустријским системима (енг. *Agile Robotics Implementation Model – ARIM*), који је заснован на интеграцији принципа *Lean* производње, и методологијама *Lean* стартап и *Lean* роботика. Модел је операционализован кроз развој софтверског алата за подршку одлучивању, који омогућава процену и поређење алтернативних роботских конфигурација на основу оперативних, економских, и показатеља перформанси који се односе на квалитет и ергономију.

Емпиријска валидација спроведена је кроз студију случаја. Применом развијеног модела идентификован је најпогоднији процес за имплементацију роботског решења и оптимално роботско решење. Софтвером су предвиђена унапређења укупне ефикасности опреме са 0,68 на 0,86, смањење стопе дефеката са 2% на 1%, док је након имплементације флексибилне роботске станице мерење кључних индикатора перформанси указало на остварење поврата на улагање од 32,41%, односно период повраћаја од 3,03 године. Слагање предвиђених и остварених вредности потврђено је просечном апсолутном процентуалном грешком од 2,62%.

Научни допринос рада огледа се у развоју интегрисаног и итеративног оквира који повезује *Lean* и агилност са квантитативном подршком одлучивању у усвајању напредних роботских решења. Практичан допринос представља развијени софтверски алат који омогућава транспарентну и на подацима засновану одлуку о инвестирању у роботско решење у условима ограничених ресурса.

Кључне речи: *ARIM, Lean* индустријски системи, *Lean* роботика, *Lean* стартап, имплементација роботских решења, кључни индикатори перформанси, подршка одлучивању, Индустрија 4.0, флексибилна роботска станица.

Abstract

Lean industrial systems operate in turbulent markets where increasing productivity and flexibility have become imperative, while resources remain constrained. They can improve their processes through the implementation of advanced robotic solutions.

The subject of this doctoral dissertation is the development of an agile model for implementing robotic solutions, referred to as the *Agile Robotics Implementation Model (ARIM)*. The model integrates *Lean manufacturing* principles with the *Lean Startup* and *Lean Robotics* methodologies. It is operationalized through a decision-support software tool that enables the evaluation and comparison of alternative robotic configurations based on operational, economic, quality, and ergonomic performance indicators.

Empirical validation was conducted through a case study. Application of the developed model enabled the identification of the most suitable process for robotic implementation and the optimal robotic solution. The software predicted an improvement in Overall Equipment Effectiveness from 0.68 to 0.86 and a reduction in the defect rate from 2% to 1%. Following implementation of a Flexible Robotic Station, measurement of key performance indicators showed a return on investment of 32.41% and a payback period of 3.03 years. Agreement between predicted and realized values was confirmed by a Mean Absolute Percentage Error of 2.63%.

The scientific contribution lies in the development of an integrated and iterative framework that combines *Lean* and agile principles with quantitative decision support for the adoption of advanced robotic solutions. The practical contribution is the developed software tool, which enables transparent and data-driven decision-making regarding investments in robotic solutions under resource constraints.

Keywords: *ARIM, Lean* industrial systems, *Lean Robotics, Lean Startup*, implementation of robotic solutions, key performance indicators, decision support, Industry 4.0, Flexible Robotic Station.

Садржај

1. Уводна разматрања 1
   1.1 Предмет рада 1
   1.2 Научни циљ рада 2
   1.3 Хипотезе 3
   1.4 Преглед коришћених метода 3
2. Теоријски оквир истраживања 5
   2.1 *Lean* концепт 5
      2.1.1 Развој *Lean* филозофије 7
      2.1.2 Основни принципи *Lean* филозофије 8
      2.1.3 *Lean* алати и методе 8
      2.1.4 Мапирање тока вредности савремених индустријских система 10
      2.1.5 *Lean* индустријски системи 10
      2.1.6 Карактеристике *Lean* индустријских система 11
   2.2 Индустрија 4.0 и дигитална трансформација производње 12
      2.2.1 Историјски развој индустријских револуција 12
      2.2.2 Прва, друга и трећа индустријска револуција 12
      2.2.3 Концепт и основне карактеристике Индустрије 4.0 14
      2.2.4 Утицај Индустрије 4.0 на *Lean* индустријске системе 18
   2.3 Напредна роботска решења 19
      2.3.1 Индустријски роботи 21
      2.3.2 Колаборативни роботи 25
      2.3.3 Аутономни мобилни роботи 27
      2.3.4 Критеријуми избора и параметри роботских система 28
      2.3.5 Флексибилна роботска станица 29
   2.4 Ограничења класичног *Lean* приступа у контексту аутоматизације 30
      2.4.1 Напредна роботска решења у *Lean* индустријским системима и изазови имплементације 30
   2.5 *Lean* стартап и *Lean* роботика као методолошка основа развоја роботских система 32
      2.5.1 Методологија *Lean* роботике 32
      2.5.2 *Lean* стартап методологија 35
   2.6 Вишекритеријумско одлучивање у контексту имплементације роботских решења у *Lean* индустријским системима 37
   2.7 Истраживање засновано на дизајну 39

2.8 Истраживачки јаз ... 40
3. Развој агилног модела имплементације роботских решења у *Lean* индустријским системима *(Agile Robotic Implementation Model – ARIM)* ... 42
3.1 Основни теоријски концепти интегрисани у *ARIM* ... 42
3.2 Концептуални оквир модела ... 42
3.3 Методологија развоја и операционализације *ARIM* модела ... 45
3.3.1 Операционализација модела кроз софтверски алат ... 46
3.3.2 Евалуација и итеративно усавршавање модела ... 47
3.4 Логичка структура и ток *ARIM* модела ... 47
3.4.1 Почетна процена ... 48
3.4.2 *Robotic Startup Cycle (RSC)* ... 50
3.4.3 Пилот тестирање ... 56
3.5 *Lean* основе *ARIM* модела ... 57
3.6 Алат за подршку одлучивању заснован на КПИ ... 58
3.6.1 Идентификација КПИ из литературе ... 58
3.6.2 Експертска валидација КПИ идентификованих у литератури ... 59
3.7 Концептуалне карактеристике и допринос *ARIM* модела ... 64
4. Софтвер за подршку одлучивању и операционализацију *ARIM* модела ... 66
4.1 Изазови процене оправданости имплементације роботског решења ... 66
4.2 Процес обраде информација од улаза до излаза ... 67
4.3 Структурни преглед програмског система ... 68
4.4 Математичка и оперативна логика ... 73
4.5 Хибридна стратегија релационог и *JSONB* складиштења ... 77
4.6 Унакрсна провера конзистентности прорачуна ... 79
5. Емпиријска валидација *ARIM* модела ... 80
5.1 Опис компаније ... 80
5.2 Анализа тренутног стања ... 82
5.3 Иницијална процена ... 87
5.3.1 Анализа осетљивости резултата ... 93
5.3.2 Будућа мапа тока вредности ... 94
5.4 Robotic Startup Cycle ... 96
5.4.1 Флексибилни трансформативни систем - ФТС ... 96
5.4.2 Евалуација ... 97
5.4.3 Анализа осетљивости ... 102
5.4.4 Итерација ... 108
5.5 Пилот тестирање ... 109
6. Дискусија ... 114

6.1 Разматрање постављених хипотеза 115
6.2 Ограничења модела 116
6.3 Будући правци истраживања 117
7. Закључак 118
Литература 119
Прилог – Приказ корисничког интерфејса развијеног софтверског решења 133
Биографија 137

Списак слика

Слика 1 Концепт Тојота производног система 5
Слика 2 Пет кључних принципа *Lean* филозофије 8
Слика 3 Индустријске револуције 12
Слика 4 Основна обележја Прве индустријске револуције 13
Слика 5 Основна обележја Друге индустријске револуције 13
Слика 6 Основна обележја Треће индустријске револуције 14
Слика 7 Основна обележја Индустрије 4.0 14
Слика 8 Врсте симулација 17
Слика 9 Број инсталираних роботских решења на годишњем нивоу (IFR, 2025) 19
Слика 10 Основне компоненте индустријских робота 21
Слика 11 Могуће комбинације поновљивости и тачности индустријских робота 23
Слика 12 Механичка хватаљка са прстима 23
Слика 13 Дупла хватаљка 23
Слика 14 Вакуумска хватаљка 23
Слика 15 Магнетна хватаљка 24
Слика 16 Адхезивна хватаљка 24
Слика 17 Универзална хватаљка 24
Слика 18 Нивои сарадње између робота и човека; прилагођено (Malik & Bilberg, 2019) 26
Слика 19 Принципи *Lean* роботике 33
Слика 20 Преглед фаза развоја роботске радне станице у *Lean* роботици 34
Слика 21 Резиме фазе дизајна 34
Слика 22 Направи-Измери-Научи, енг. *Build-Measure-Learn,* прилагођено (Ries, 2011) 36
Слика 23 Концептуална структура и ток *ARIM* модела 45
Слика 24 DSR приступ примењен на развој и валидацију *ARIM*-а 46
Слика 25 Почетна процена 49
Слика 26 Софтвер за подршку одлучивању 53
Слика 27 Фаза итерације 55
Слика 28 Процес обраде информација 67
Слика 29 Архитектонски дизајн софтвера 68
Слика 30 *Cloud-native* окружење и употреба serverless инфраструктуре. 69
Слика 31 Дијаграм контекста система 70
Слика 32 Декомпозиција платформе на примарне извршне целине 70
Слика 33 Модел компоненти *backend*-а 71
Слика 34 Модел компоненти *frontend*-а 71
Слика 35 Структурне фазе математичког прорачунског језгра 73
Слика 36 Фазе економске процене инвестиције 78
Слика 37 Мапа тока вредности почетног стања у индустријском систему 82
Слика 38 Радна станица одабрана за имплементацију роботског решења 94
Слика 39 Будућа мапа тока вредности 95
Слика 40 Сценарио А vs Сценарио Б 102
Слика 41 Сценарио А vs мануелни трансфер 102
Слика 42 Радна станица након имплементације роботског решења 110

Списак табела

Табела 1 *Lean* алати 9
Табела 2 Дефиниције индустријских робота 20
Табела 3 Број степени слободе у зависности од врсте зглоба робота 22
Табела 4 Параметри робота у односу на карактеристике процеса 29
Табела 5 Одабир *MCDM* методе 38
Табела 6 Фазе *DSR* парадигме у развоју модела 40
Табела 7 Теоријске основе интегрисане у *ARIM* моделу 43
Табела 8 Улазни параметри фазе почетна процена 49
Табела 9 Форма матрице приоритета 50
Табела 10 Концептуална повезаност *ARIM* модела и *Lean* принципа 57
Табела 11 КПИ из литературе 59
Табела 12 Валидација КПИ идентификованих у литератури од стране експерата 61
Табела 13 Проширена листа КПИ 62
Табела 14 Коначан списак КПИ 63
Табела 15 Циљеви развоја софтверског решења 67
Табела 16 Коришћене технологије за развој софтвера 72
Табела 17 Методолошке опције модела и њихов утицај на обрачун 76
Табела 18 Компанија у којој је спроведена студија случаја 81
Табела 19 Параметри производних операција 84
Табела 20 Времена чекања процеса емајлирања посуђа 85
Табела 21 Идентификовани *Lean* губици 86
Табела 22 Радне станице идентификоване као потенцијалне за имплементацију роботског решења 87
Табела 23 Елементи радних станица погодни за имплементацију роботског решења 88
Табела 24 Прелиминарни услови за имплементацију роботског решења кандидатских радних станица 88
Табела 25 Критеријуми за оцењивање алтернатива применом *WSM* методе 89
Табела 26 Структура експертског панела 90
Табела 27 Тежински коефицијенти 90
Табела 28 Типови нормализације по категоријама критеријума 91
Табела 29 Рачунање *WSM* оцене за радну станицу А 91
Табела 30 Рачунање *WSM* оцене за радну станицу Б 92
Табела 31 Анализа осетљивости WSM методе 94
Табела 32 Најзначајније разлике између мапе тока вредности пре и после имплементације роботског решења 95
Табела 33 Ограничења за одабир роботског решења 96
Табела 34 Идентификована роботска решења у оквиру дефинисаних захтева 97
Табела 35 Добијени КПИ за мануелни трансфер, Сценарио А и Сценарио Б 98
Табела 36 КПИ за две алтернативне роботске конфигурације 100
Табела 37 Анализа осетљивости нето садашње вредност (проширени ефекти) 103
Табела 38 Анализа осетљивости – Период повраћаја инвестиције 104
Табела 39 Анализа осетљивости – Нето садашња вредност (директни ефекти) 106
Табела 40 Анализа осетљивости – Нето добит 107
Табела 41 Најзначајнији сегменти анализе осетљивости 108
Табела 42 Дефинисани циљеви и предвиђене вредности у случају имплементације решења дефинисаног у оквиру Сценарија 108
Табела 43 Одлука о заустављању итеративног процеса 109
Табела 44 Предвиђени, реализовани КПИ и оцена одступања 111

1. Уводна разматрања

1.1 Предмет рада

Иако не постоји општеприхваћена дефиниција термина Индустрија 4.0, сам појам дефинише се у ширем смислу као трансформација привреде која се дешава под утицајем технолошких достигнућа. Промене које се дешавају утичу директно или индиректно и на индустријске системе. Континуитет у унапређењу компетитивне предности је неопходан сваком индустријском систему како би опстало у турбулентним тржишним условима (Kutnjak, Pihir, & Tamačić Furjan, 2019). Унапређење компетитивне предности може се подразумевати унапређења радних услова, пословања, организационе структуре или трансформације процеса и производа (Matt, Hess, & Benlian, 2015). Поред наведеног, имплементација технолошких достигнућа такође омогућава реализацију и задржавање компетитивних предности (Fitzgerald, et al., 2013) (Ross, et al., 2016). Индустрија 4.0 представља инжењерски ресурс који имплицира већи степен аутоматизације како у предузећима тако и у *Lean* индустријским системима. *Lean* индустријски системи своје пословање усклађују са перманентним циљем апсолутног елиминисања сваког облика губитка. Индустријски системи који своје пословање базирају на *Lean* принципима стреме унапређењу процеса и као императив се јављају унапред дефинисани циљеви за чију реализацију је неопходно изналажење новог модела.

Савремена литература препознаје девет пилара Индустрије 4.0 (Saucedo-Martinez, Perez-Lara, & Marmolejo-Saucedo, 2017), а напредна роботика представља један од тих пилара. Имплементација напредних роботских решења у *Lean* индустријским системима омогућава унапређење перформанси и остваривање боље конкурентске позиције (Botti, Mora, & Regattieri, 2017). Предмет интересовања многих аутора представља управо имплементација роботских решења у *Lean* индустријским системима (Botti, Mora, & Regattieri, 2017; Colim, et al., 2021). Да би роботско решење било успешно имплементирано у оквиру *Lean* индустријског система неопходно је да сам процес имплементације буде ефикасан и да постоји нулта толеранција према различитим облицима губитака и расипања. Аутоматизација мануелне радне станице у неком *Lean* индустријском систему осим постизању бољег конкурентског положаја захваљујући унапређењу процеса може значајно допринети и смањењу повреда на раду, као и повећању квалитета производа, ефикасности и ефективности. Када дође до аутоматизације мануелне радне станице, пословни напредак се огледа и у унапређењу продуктивности и подстицању људских ресурса у максимизирању искоришћења својих интелектуалних капацитета.

И поред бројних бенефита које је могуће увидети приликом аутоматизације мануелне радне станице, односно имплементације напредног роботског решења у оквиру *Lean* индустријског система, постоје одређени проблеми који се могу јавити. Перманентни проблеми односе се на неадекватне лидерске способности, недостатак одговарајућег плана интеграције и неодговарајућу пословну културу (Duarte & Cruz-Machado, 2019). Иако унапређена технолошка решења доприносе унапређењу перформанси, може се десити да услед неодговарајуће одлуке дође до бескорисног усложњавања процеса и разилажења са постојећом технологијом. Индустријска пракса препознаје бројне недоумице око будућих перформанси потенцијалног роботског решења у коегзистенцији са постојећим производним решењима, али као најбитнија у имплементацији неретко се издвајају финансијска ограничења. Финансијска ограничења

односе се не само на недовољним финансијским средствима опредељеним из буџета једног индустријског система за ове намене, већ и на недовољну спремност читавог ентитета да поднесе потенцијалне ризике исплативости.

У складу са наведеним, предмет докторске дисертације јесте развој методолошког модела за подршку одлучивању о избору, развоју, тестирању и имплементацији напредних роботских решења у *Lean* индустријским системима. Предложени модел има за циљ да омогући систематичан и итеративан процес процене и развоја роботског решења, уз постепено смањивање неизвесности и ризика пре његове пуне имплементације у реалном производном окружењу.

Предмет истраживања обухвата анализу постојећег производног система и идентификацију процеса погодних за роботизацију, приоритизацију потенцијалних радних станица, развој и тестирање различитих конфигурација роботских решења, мерење њихових перформанси и процену услова за коначну имплементацију. Посебна пажња усмерена је на могућност итеративног тестирања и унапређења роботског решења.

Теоријски и практични аспект истраживања заснива се на интеграцији принципа *Lean* производње, *Lean* роботике, *Lean* стартап методологије, као и концепата Индустрије 4.0 и Индустрије 5.0. У том контексту, роботизација се не посматра као изолована технолошка интервенција, већ као промена која треба да допринесе унапређењу целокупног производног система. Процена ефеката роботизације обухвата следеће аспекте перформанси:

- Финансијске,
- Оперативне,
- Квалитет,
- Ергономија.

У циљу практичне примене предложеног приступа развијен је и софтверски алат за подршку одлучивању. Коначна примена и провера развијеног модела и софтверског алата спроведена је у реалном индустријском окружењу кроз студију случаја, чиме је омогућена процена његове применљивости и доприноса доношењу одлука о имплементацији напредних роботских решења.

1.2 Научни циљ рада

Научни циљ рада је развој интегрисаног модела за подршку одлучивању о имплементацији роботских решења у *Lean* индустријским системима. Модел треба да повеже техничке, производне и економске аспекте имплементације роботских решења. Параметри производног система и саме карактеристике роботског решења треба да омогуће процену перформанси система након имплементације роботског решења, а пре саме инвестиције.

Истраживање је усмерено на развој *ARIM* модела, његову математичку операционализацију и имплементацију у облику система за подршку одлучивању. Посебан циљ јесте омогућавање поређења различитих сценарија имплементације роботских решења и идентификовање фактора који су критични за резултат процене инвестиционе одлуке.

1.3 Хипотезе

Докторска дисертација заснива се на следећим хипотезама:

I. Конципирајући широк спектар фактора могуће је креирати модел који ће предвидети будуће стање *Lean* индустријског система као и предности и недостатке који проистичу из промена насталих услед имплементације роботског решења на место мануелне радне станице.
II. Симулирањем процеса производње у реалном индустријском окружењу могуће је са високом тачношћу и са уштедом у времену одредити мануелну радну станицу коју треба заменити адекватним роботским решењем у сврху унапређења ефективности и ефикасности процеса производње.
III. Задавањем параметара резултата симулације процеса производње и конкретног роботског решења које ће бити имплементиран у оквиру *Lean* индустријског система могу се добити прецизне информације о времену повраћаја инвестиције и преломној тачки рентабилности.
IV. Развијени модел може бити примењен у *Lean* индустријским системима без обзира на величину и делатност.

1.4 Преглед коришћених метода

У истраживању је примењен комбиновани методолошки приступ који обухвата теоријске, квалитативне и квантитативне методе

У теоријском делу истраживања примењене су метода анализе и синтезе, као и компаративна метода, ради систематизације постојећих научних сазнања и идентификовања недовољно истражених аспеката процене имплементације роботских решења у *Lean* индустријским системима. На основу анализе релевантне литературе дефинисан је теоријски оквир истраживања и утврђена основа за развој модела.

Приступ истраживања науке о дизајну (енг. *Design Science Research – DSR),* је коришћен као основна истраживачка парадигма за развој и евалуацију предложеног *ARIM* модела. За развој *ARIM* модела коришћена је метода моделовања, којом су идентификовани релевантни улазни параметри и њихове међусобне везе, док је применом математичког и економског моделовања извршена операционализација показатеља перформанси.

За експертску валидацију и допуну идентификованих КПИ примењена је метода полуструктурираних интервјуа са стручњацима из области *Lean* индустријских система, роботизације и аутоматизације. Ставови експерата анализирани су применом *Likert* скале.

У оквиру иницијалне процене потенцијалних радних станица за роботизацију примењена је метода пондерисаног збира (енг. *Weighted Sum Method – WSM*). На овај начин извршено је вишекритеријумско рангирање процеса на основу техничких, оперативних, економских, безбедносних, ергономских и организационих критеријума.

Емпиријска провера спроведена је кроз индустријску студију случаја, у оквиру које су поређене перформансе мануелног и роботизованог сценарија. Анализа осетљивости коришћена је за испитивање утицаја промене кључних улазних параметара на резултате модела и процену робусности добијених резултата.

Симулациони приступ и сценаријска анализа коришћени су за поређење мануелног и роботизованог начина производње и процену очекиваних ефеката различитих роботских решења пре њихове физичке имплементације.

За проверу математичке конзистентности примењена је метода унакрсне валидације, односно поређење резултата независних имплементација прорачунског језгра у *Python* и *TypeScript* окружењу. Поред тога, проверене су основне математичке и економске инваријанте модела и понашање система у граничним случајевима.

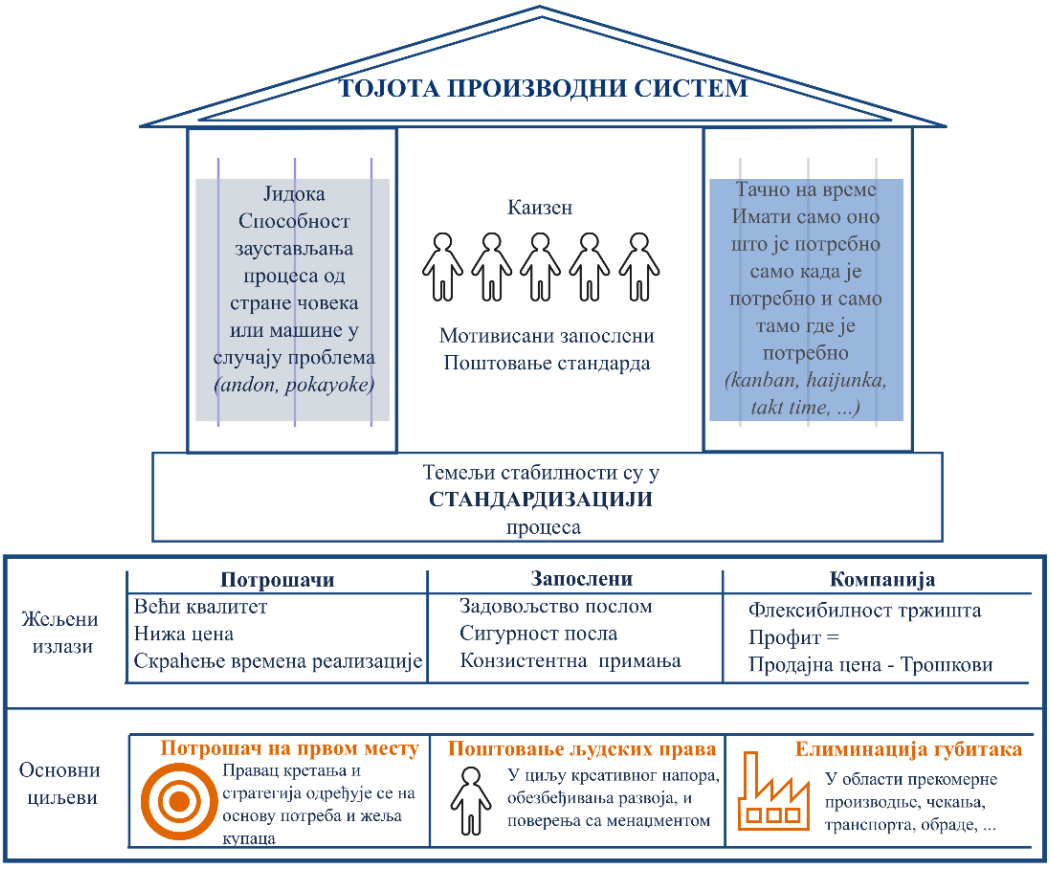
Коначно, дедуктивним и индуктивним закључивањем резултати појединачних фаза истраживања повезани су у целину, на основу чега је извршена оцена постављених хипотеза и формулисан научни и практични допринос истраживања

2. Теоријски оквир истраживања

2.1 *Lean* концепт

Lean филозофија представља један од најзаступљенијих концепата за унапређење производних система (Cullinane, et al., 2014), а као холистички концепт развијала се годинама. *Lean* филозофија омогућава систематску елиминацију губитака, повећање вредности за купца и континуирано унапређење процеса. Управо због ових карактеристика *Lean* је постао основа великог броја савремених приступа организацији производње.

Развоју концепта *Lean* производње претходи настанак и развој Тојота производног система (енг. *Toyota Production System – TPS*). Тојота производни систем доследно елиминише сваки сувишан трошак - све што није неопходно за производњу сматра се губитком - и истовремено максимално користи способности радника (Sugimori, Kusunoki, Cho, & Uchikawa, 1977). Тојота производни систем подразумева стварање добрих услова рада и омогућавање радницима да у потпуности испоље свој потенцијал, и састоји се од два стуба „тачно на време“ (енг. *Just in time – JIT*) и Јидока (Ohno, 1988). На слици 1 приказан је концепт Тојота производног система.



Слика 1 Концепт Тојота производног система

Иако се *Lean* филозофија историјски развила из Тојота производног система, данас *Lean* представља знатно шири концепт који превазилази производне системе компаније Тојота. Основни принципи *Lean* филозофије нашли су примену у различитим индустријама што је довело до еволуције *Lean*-а од производне филозофије ка општој методологији управљања организационим процесима.

Lean производња је систематски приступ који омогућава побољшану оперативну ефикасност кроз идентификацију и елиминацију губитака и стабилизацију процеса (Dankbaar, 1997; Sahoo, et al. 2008). *Lean* покрива све аспекте производње од почетне фазе животног циклуса производа па све до дистрибуције (Womack & Jones, 1996) и представља вишедимензионални приступ који делује синергијски како би се креирао ефикасан и висококвалитетан систем усклађен са темпом потражње купаца (Shah & Ward, 2003). *Lean* у фокус ставља минимизирање губитака до тренутка испоруке производа (Shah & Ward, 2003), као и стварање додате вредности за купце (Hu, et al. 2015). За разлику од традиционалног концепта производње, *Lean* производња залихе сматра губитком (Shaman & Sanjiv Kumar, 2013). Мада се дефиниције *Lean* концепта разликују, заједничка карактеристика свих приступа је да *Lean* не представља скуп појединачних алата, већ интегрисану филозофију управљања процесима.

Традиционално дефинисање седам губитака *Lean*-а обухвата (Fercoq, Lamouri, & Carbone, 2016; Jordan, et al., 2019; Sivarman, et al., 2020):

- Прекомерну производњу – производња веће количине производа него што се може продати без смањења цене или других уступака неповољних по произвођача (Yang, Hong, & Modi, 2011). Ово се односи и на прекомерну производњу за сваки наредни процес, а не само за крајњег купца.
- Чекање – најчешће настаје због прекомерне алокације времена оператера. Да би се утврдили напори потребни да се елиминише време чекања морају се посматрати функције које зависе од времена застоја, времена одговора, одобрења потписа и друго.
- Транспорт – губици у вези са транспортом могу настати унутар самог производног процеса или изван њега (Arunagiri & Gnanavelbabu, 2014). Сваки непотребан транспорт треба елиминисати а све могућности минимизирања ових трошкова искористити.
- Грешке – грешке које настају у процесу производње често представљају круцијалне трошкове који се могу класификовати као директни или индиректни. Принцип тежње ка савршенству наглашава између осталог и фокус на квалитет и као такав представља почетни корак у усвајању *Lean*-а.
- Залихе – вишак залиха такође утиче на негативне новчане токове. Елиминисање залиха доприноси постизању континуалног тока.
- Кретање – у случају постојања непотребног кретања долази и до кашњења или неискоришћавања времена на оптималан начин.
- Прекомерна обрада – симплификација процеса производње од кључног је значаја и у складу са тим неопходно је рационализовати или елиминисати кораке обраде (Arunagiri & Gnanavelbabu, 2014).

Анализа *Lean* губитака има далеко шири значај од њихове класификације, јер представља основ за доношење одлука о унапређењу производних процеса. Различити губици захтевају различите приступе како би били отклоњени. Због овога, идентификација губитака представља полазну тачку у планирању активности којима се може повећати ефикасност, квалитет и вредност за купца.

Недавно је предложено обухватање још две врсте губитака када је реч о *Lean* губицима (Vinodh, Kumar, & Vimal, 2014):

- Недовољна искоришћеност креативности запослених и
- Еколошки губитак.

Проширење модела *Lean* губитака указује на то да је *Lean* филозофија приступ који се прилагођава савременим изазовима, а не статичан концепт.

2.1.1 Развој *Lean* филозофије

Иако се *Lean* приступ у литератури најчешће повезује са јапанском аутомобилском индустријом и развојем Тојота производног система, истраживачи указују да основни *Lean* принципи имају значајно старије порекло.

Развој *Lean*-а везује се за крај XVIII и почетак XIX века и концепт стандардизованих и заменљивих делова (енг. *interchangeable parts*) који је развио *Eli Whitney*. Овај приступ поставио је темеље за прелазак са занатске на индустријску и каснију масовну производњу (Womack, Jones, & Roos, 1990). Осим тога, *Frederick W. Taylor* уводи научни менаџмент који је заснован на анализи рада, студији времена и стандардизацији радних операција. Овај приступ повећава продуктивност али и уводи ригидну поделу рада (Taylor, 1911). Даљи развој студије покрета (енг. *motion study*) фокус помера ка елиминацији непотребних покрета и разумевању људског фактора рада (Gilbeth, 1917).

Двадесетих година XX века *Henry Ford* је у својим производним погонима примењивао концепте који су суштински блиски савременом схватању *Lean* филозофије. У делу *„Today and Tomorrow“* из 1926. године експлицитно је наглашено да се ефикасност производње темељи на скраћивању производног циклуса и минимизирању непотребних кретања материјала (Ford, 1926). Управо ово представља и једно од централних начела *Lean*-а. *„Једно од најзначајнијих достигнућа у одржавању ниске цене Фордових производа јесте постепено скраћивање производног циклуса. Што је неки производ дуже у процесу производње и што се више премешта, већа је његова крајња цена“*[1] (Ford, 1926). Иако Фордов модел представља основу масовне производње, он је био заснован на високим залихама, великим серијама и централизованој контроли процеса, што ће касније постати супротно *Lean* филозофији.

Након Другог светског рата *Taiichi Ohno, Shigeo Shingo* и *Eiji Toyoda* обликују Тојота производни систем који се заснива на елиминацији губитака у свим облицима, уз унапређење тока процеса и флексибилности производње (Ohno, 1988). Ово представља битну трансформацију ка *Lean* концепту, заједно са доприносима *Edwards W. Deming*-а и *Joseph M. Juran*-а који уводе циклус Планирај-Уради-Провери-Делуј (енг. *Plan-Do-Check-Act*; *PDCA*), као основу континуираног унапређења процеса и квалитета (Deming, 1986), и концепт управљања квалитетом, кроз Јуран трилогију и примену Парето принципа у анализи проблема квалитета (Juran, 1989)

Књига *„The Machine that Changed the World“* (Womack, Jones & Roos, 1990) привукла је широку глобалну пажњу на *Lean* концепт. Након објављивања, *Lean* се формализује као доминантна парадигма ефикасне производње. *Lean* концепт коришћен је како би се производња стално усавршавала и како би се елиминисали кораци који нису неопходни, што доприноси оптимизацији процеса, повећању продуктивности и већој вредности за купца.

[1] *“One of the most noteworthy accomplishments in keeping the price of Ford products low is the gradual shortening of the production cycle. The longer an article is in the process of manufacture and the more it is moved about, the greater is its ultimate cost.”* Henry Ford 1926

2.1.2 Основни принципи *Lean* филозофије

У литератури дефинисање термина *Lean*-а обухвата широк опсег, од метода до система (Bhamu & Sangwan, 2014). Преглед литературе која разматра *Lean* принципе и *Lean* производњу обухвата бројне концептуалне прегледе, као што су *Lean* производња у периоду од једног века (Papadopoulou & Ozbayrak, 2005), *Lean* принципи и пракса са фокусом на уско грло (Pettersen, 2009), *Lean* у различитим секторима индустрије (Moyano-Fuentes & Sacristan-Diaz, 2012). Поред тога, постоје и истраживања која се фокусирају на утицај *Lean* производње на продуктивност (Arlbjorn & Freytag, 2013), она која укључују само емпиријска истраживања (Flynn, et al., 1990), или стављају фокус на унапређење раста и релевантности у истраживачкој области (Jasti & Kodali, 2014).Ова разноврсност приступа доводи до фрагментације истраживачког поља, где се *Lean* представља као филозофија, методологија или скуп алата, а дефинише се од скупа оперативних метода до свеобухватног управљачког система и организационе филозофије. Као савремена производна филозофија, *Lean* се заснива на пет међусобно повезаних принципа (Womack & Jones, 1996), приказаних на слици 2:

- Дефинисање вредности из перспективе купца (*Value*),
- Мапирање тока вредности (*Value Stream*),
- Успостављање континуираног тока процеса (*Flow*),
- Имплементација система повлачења заснованог на потражњи (*Pull*),
- Тежња ка савршенству кроз континуирано унапређење (*Perfection*).



Слика 2 Пет кључних принципа Lean филозофије

Вредност *(Value)* представља оно што купац жели и за шта је спреман да плати. Све активности које не доприносе вредности сматрају се потенцијалним губитком *(Waste)*. Мапирање тока вредности *(Value Stream)* подразумева анализу целог тока процеса и идентификовање свих активности, уклањање оних које не додају вредност и оптимизовање целокупног процеса. Након елиминације отпада процес треба да тече глатко без прекида, чекања или застоја *(Flow)*. Производња се покреће када постоји реална потражња купаца *(Pull)*, а систем се континуирано побољшава кроз стално смањење губитака, унапређење квалитета и побољшавање процеса *(Perfection)*. Примена *Lean* принципа некада варира у зависности од индустријског контекста и нивоа технолошке зрелости организације. Док се *Value* конзистентно дефинише кроз перспективу купца, принципи *Flow* и *Pull* некада захтевају адаптације, када је на пример реч о сложеним или високоаутоматизованим системима.

2.1.3 *Lean* алати и методе

Lean алати подржавају функционисање *Lean* система и служе као механизам за имплементацију *Lean* принципа у реалном окружењу. *Lean* приступ се у литератури

посматра из стратешке перспективе, која се фокусира на принципе и концептуалне оквире *Lean* филозофије, и тактичке, која обухвата практичне аспекте и инструменте његове имплементације у производним системима (Thangarajoo & Smith, 2015). Неколико главних алата који се користе у имплементацији *Lean* филозофије у различитим системима су*: 5S, Just in Time, Jidoka, Kanban, Kaizen, PDCA* циклус, мапа тока вредности (енг. *Value Stream Map – VSM*), *Poka Yoke* и тотално продуктивно одржавање (енг. *Total Productive Maintenance – TPM*) (Gomes Rossi, et al., 2022). Наведени алати се често сматрају кључним, али литература показује значајне разлике у одабиру и категоризацији (Liker, 2020; Dombrowski & Mielke, 2015). Различити аутори истичу различите комбинације алата у зависности од контекста, типа индустрије и периода у којем је *Lean* примењиван. У литератури се сви наведени елементи често групишу као *Lean* алати, али како би се нагласила њихова различита улога у производним системима и контексту примене може се извршити њихова подела на класичне *Lean* алате, *Lean* концепте и методологије, и подршка *Lean* имплементацији. Примена *Lean* алата заснива се на основним *Lean* принципима.

У табели 1 приказани су алати који се најчешће користе као и алати који доприносе флексибилности, дигитализацији и интеграцији *Lean* принципа са аутоматизованим и интелигентним производним окружењем.

Табела 1 Lean алати

Категорија	Алат / Концепт	Кратак опис и функција у *Lean* систему
***Lean* алати**	*VSM*	Мапирање тока вредности ради идентификације губитака и оптимизације процеса
	Kanban	Сигнални систем за контролу тока материјала и производње
	Visual Management	Визуални показатељи стања производње и одступања
	Andon	Сигнализација проблема у реалном времену и покретање корективних мера
	Jidoka	Аутономација са људским надзором, контролисање квалитета у извору
	Poka Yoke	Дизајн процеса који спречава појаву грешака
	TPM	Превентивно и продуктивно одржавање опреме
	Kaizen	Континуирано унапређење процеса уз учешће свих запослених
	JIT	Производња по стварној потражњи, смањује залихе и време протока
Допуњавајући алати и праксе	*5S*	Организација радног простора ради елиминације губитака, визуелне контроле и подршке току производње
	Heijunka	Уравнотежење производње ради стабилног и предвидивог протока
	Standard Work	Стандардизовани рад као основа за поновљивост и побољшања
	SMED	Скраћење времена подешавања ради флексибилности и брзе реакције на потражњу
	Gemba	Посета месту рада ради идентификације губитака и побољшања процеса
	Visual Control Boards	Табле за праћење статуса производње и брзо реаговање на одступања
	Kaikaku	Револуционарна побољшања која мењају начин рада или структуру процеса

2.1.4 Мапирање тока вредности савремених индустријских система

Мапирање тока вредности (енг. *Value Stream Mapping – VSM*) представља алат који помаже у визуелизацији производног процеса, укључујући и ток материјала и ток информација и омогућава његово унапређење (Singh, Garg, & Sharma, 2011). Ток вредности обухвата активности које додају, као и активности које не додају вредност али су неопходне како би производ од сировина дошао до крајњих купаца (Rother & Shook, 1999). Мапирањем тока вредности омогућава се сагледавање стања у читавом индустријском систему а не само у једном сегменту. Мапирањем тока вредности могуће је утврдити потенцијална места на којима је могуће извршити корекције како би се унапредило стање читавог система (Klotz, Horman, Bi & Bechtel, 2008) као и смањење залиха или времена испоруке (Abdulmalek & Rajgopal, 2007; Singh & Singh, 2012). Мапирање тока вредности омогућава идентификацију уских грла, губитака и неефикасности.

Овај концепт се први пут појављује 1995. године, и представља се као група техника којом се идентификују губици у току вредности и тежи њиховом уклањању (Hines & Rich, 1997). Касније се раздвајају активности које додају, односно не додају вредност у токовима материјала и информација кроз систематску елиминацију губитака и континуираног побољшања (Rother & Shook, 1999). Анализа вредности и губитака у току вредности одвија се у четири фазе (Tapping & Shuker, 2003):

- Избор производа или групе производа,
- Цртање тренутне мапе тока вредности (представља се процес као и активности које додају, односно не додају вредност тренутном стању),
- Цртање будуће мапе тока вредности (систематске смернице за унапређење будућег стања),
- Достизање будућег стања (развијају се смернице и прави план достизања будућег стања).

Најчешћи губици који се идентификују везани су за залихе, чекање, непотребно кретање, транспорт, дефекте и прекомерну обраду. Основни индикатор ефикасности производног система представља однос између укупног времена протока (енг. *Lead time*) и времена везаног за активности које додају вредност. Најзначајније ограничење мапирања тока вредности односи се на статичко приказивање динамичког система. Са друге стране, на основу анализе тренутног стања идентификују се кључни проблеми и представља оптимизована верзија система дефинисана у складу са *Lean* принципима (Nikolic, et al., 2023). Ово омогућава прелазак са дескриптивне на прескриптивну анализу система. Ограничења алата могу се ублажити и интеграцијом са дигиталним технологијама, симулацијама, и праћењем система у реалном времену. Због тога, мапа тока вредности користи се у индустријским системима и за идентификацију потенцијалних места за аутоматизацију и имплементацију роботских решења.

2.1.5 *Lean* индустријски системи

Концепт *Lean*-а данас се примењује у свим развијеним индустријама, али у теорији још увек не постоји општеприхваћена дефиниција термина „*Lean* индустријски системи“[2].

[2] *Lean* индустријски системи су индустријски системи који су организовани на *Lean* принципима. Фокусираност на континуирано побољшање пословних и производних процеса представља један од најважнијих елемената пословне стратегије *Lean* индустријских система. *Lean* индустријски системи теже

Lean индустријски системи заснивају се на систематском и континуираном смањењу активности које не додају вредност (Dombrowski & Mielke, 2015), као и на увођењу континуираних побољшања и елиминацији непотребних корака у процесу (Mrugalska & Wyrwicka, 2017). Ови системи теже минимизирању губитака у свим фазама производног процеса (Steward, 2011; Kolberg & Zuhlke, 2015), при чему се примењују *Lean* принципи који подржавају ефикасност и флексибилност.

2.1.6 Карактеристике *Lean* индустријских система

За разлику од традиционалних производних система који се ослањају на локалну оптимизацију, *Lean* индустријски системи почивају на холистичком приступу организације целокупног тока вредности. Једна од основних карактеристика *Lean* индустријских система је системски приступ. То подразумева посматрање организације као међусобно повезаног скупа процеса као и разумевање међузависности и утицаја процеса на укупне перформансе система (Liker J., 1996). Примена *Lean* концепта омогућава смањење, па чак и потпуно елиминисање губитака у производним системима (Gamage, Jayamaha, & Grigg, 2016), уз истовремено стварање додатне вредности за купце (Hu, et al., 2015). Када се примењује на адекватан начин, *Lean* омогућава већу производњу уз мање ресурса (Comm & Marhaisel, 2005). Суштински, *Lean* максимизира вредност минимизирањем губитака, поједностављујући производни процес и повећавајући његову ефикасност (Liker J., 1996). *Lean* индустријски системи настоје да елиминишу активности које не додају вредност, уз задржавање неопходне флексибилности и повећање ефективности и профитабилности.

Lean концепт може да утиче на трошкове и време производње, као и на квалитет производа, што значајно јача конкурентску позицију индустријских система који делују у условима константног притиска за нижом ценом и бољом услугом (Cullinane, et al., 2014). Савремени тржишни услови, у којима потрошачи показују све више захтева у погледу рокова испоруке и цене додатно наглашавају потребу за ефикасним производним системима (Lau, et al., 2002; Ho, et al., 2005; Jasti & Kodali, 2014). *Lean* индустријски системи се фокусирају на потражњу купаца и тиме производе висококвалитетне производе и услуге на најефикаснији и најекономичнији начин (Shaman & Sanjiv Kumar, 2013).

Lean праксе су погодне и за мала и средња предузећа јер пружају мерљиве користи уз релативно ниску инвестицију и краткорочну исплативост (Khan, Bali, & Wickramasinghe, 2007; Stankalla, Chromjakova, & Koval, 2019; Patem & Desai, 2018). Међутим, у малим и средњим предузећима усвајање *Lean* пракси и принципа често је само делимично због различитих ограничења која могу укључивати менаџерске капацитете, недостатак радне снаге као и недовољно финансијских ресурса (Karlsson & Ahlstrom, 1996; Lee, 2004).

У индустријским системима који своје пословање базирају на *Lean* методологији проблеми се брже решавају, оперативно знање запослених се боље користи а постоји и већа децентрализација одлучивања јер су ови системи снажно оријентисани на *Gemba* принцип (одлуке се доносе на месту где се рад стварно и одвија). *Lean* индустријски системи такође су оријентисани на смањење времена које прође од иницирања наруџбине до испоруке крајњем кориснику, што утиче на повећање конкурентности организације.

ка достизању „производње светске класе“ и у складу са тим су у сталној тежњи проналаска оног пословног модела који ће им то и омогућити.

Карактерише их још и смањење нивоа залиха, што омогућава ослобађање радног капитала, брже откривање проблема у процесу и смањење трошкова складиштења.

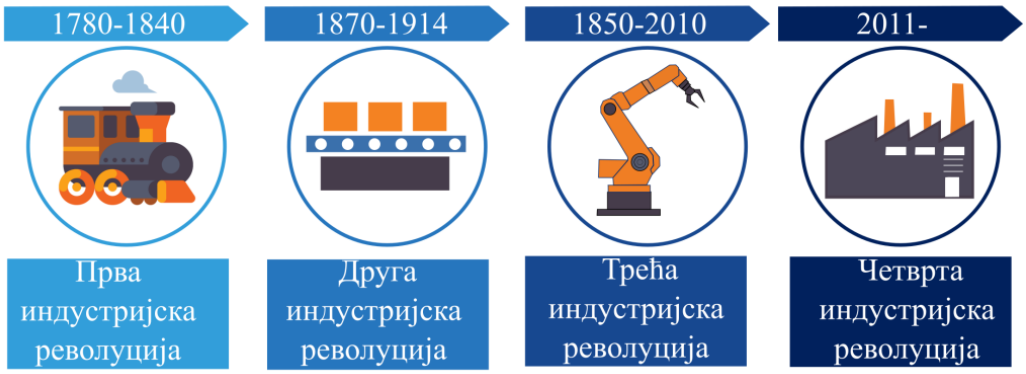
Lean представља један од најефикаснијих приступа организације производње, али савремени индустријски системи суочавају се са изазовима које класични *Lean* приступ не може у потпуности да реши. Захтев за већом флексибилношћу, краћим животним циклусом производа, недостатак радне снаге као и интензивирана дигитализација производње захтевају интеграцију *Lean*-а са напредним технолошким решењима. Ова интеграција и представља један значајан правац савремених истраживања.

2.2 Индустрија 4.0 и дигитална трансформација производње

2.2.1 Историјски развој индустријских револуција

Термин „индустријска револуција“ у литератури се појављује први пут 1884. године како би се описао развој привреде у Енглеској који је томе претходио и одвијао се у периоду од 1780. до 1840. године (Toynbee, 1884; Wilson, 2014). У општем случају, термин „индустријска револуција“ користи се да означи технолошке скокове који се дешавају у индустрији. Индустријска револуција не односи се искључиво на индустријски сектор већ директно или индиректно утиче и на остале друштвене нивое. Индустријска револуција настаје најчешће у оним тренуцима када су постојеће производне технологије и методе достигле свој врхунац. Прва индустријска револуција превасходно је фокусирана на механизацију, другу индустријску револуцију карактерише интензивирање употребе електричне енергије, док је трећа индустријска револуција омогућила аутоматизацију и базирање индустрије на дигитализацији.

Како би се разумела Четврта индустријска револуција (Индустрија 4.0) у наредном поглављу укратко су објашњене три индустријске револуције које су јој претходиле.



Слика 3 Индустријске револуције

2.2.2 Прва, друга и трећа индустријска револуција

Проналазак парне машине означава почетак прве индустријске револуције. Проналазак парне машине омогућио је нови производни процес и превазилажење земљорадње и феудалног друштва (Min, Jeanne, & Sku, 2018). Прва индустријска револуција започела је у Енглеској у области текстила, рудника, железнице, и другим облицима економских активности (Kumar, 2019). Прва индустријска револуција значајно је допринела експанзији градова и индустрије (William, 2012). Пре прве индустријске револуције више од 75% становништва живело је у руралним подручјима и у својим

радним активностима користило ручно израђене алате. Ова индустријска револуција омогућила је изузетан напредак у области прављења добара имплементацијом машина. Адам Смит (1723-1790) бавио се унапређењем ефикасности тржишта и повећањем продуктивности, а у друштву је био најзаступљенији меркантилизам (Ashton, 1948).



Слика 4 Основна обележја Прве индустријске револуције

Друга индустријска револуција одвијала се у периоду од 1870. године до 1914. Године, и допринела је измени природе организовања производње. У највећој мери промене су се огледале у измени економије обима као и у тежњи фабрика ка постизању монопола и остварењу маркетиншке предности (Mokyr, 1998). Другу индустријску револуцију карактерише значајно повећање употребе електричне енергије. Главни покретачи Друге индустријске револуције били су производња челика, мотор са унутрашњим сагоревањем, и интензивно побољшање могућности комуникације. Друга индустријска револуција обухвата појаву телеграфских мрежа, железничке пруге али и водоводних и канализационих система у неким већим градовима. Проналазак мотора са унутрашњим сагоревањем умногоме је допринео преласку са серијске на масовну производњу. Основни енергенти који су у том тренутку почели да се користе у индустријској производњи су електрична енергија и нафта. У овом периоду долази до многих техничких промена, развоја финансија и банкарског сектора. Први пут долази до трговине хартијама од вредности, убрзаног развоја краткорочних извора финансирања, клириншког банкарства, као и диференцираних могућности штедње за средњу и нижу друштвену класу (Agarwal & Agarwal, 2017).



Слика 5 Основна обележја Друге индустријске револуције

Трећа индустријска револуција започела је 50-их година XX века, тачније од 1950. године па све до 2010. године када почиње Четврта индустријска револуција. Иако су Прва и Друга индустријска револуција свој развој превасходно доживеле у Западној Европи, Трећа индустријска револуција захватила је скоро сваки део света. Може се рећи да је Трећа индустријска револуција истовремено довела до индустријског напретка у Сједињеним Америчким Државама, Немачкој и Јапану. Трећа индустријска револуција обухвата прелазак са аналогних на дигиталне технологије, и заслужна је за аутоматизацију индустријске производње. Резултат ове индустријске револуције је глобализација. Трећу индустријску револуцију пре свега карактерише имплементација

електронике и информационих технологија. Ова индустријска револуција назива се и Дигитална револуција и означава почетак информационог раздобља. Електроника и информационе технологије омогућиле су прелазак са масовне на аутоматизовану производњу. Иако је трећа индустријска револуција имала изузетан допринос унапређењу животног стандарда становништва често се поставља питање о негативним утицајима (загађење воде, ваздуха, стварање ефекта стаклене баште, глобално загревање,...) ове индустријске револуције.



Слика 6 Основна обележја Треће индустријске револуције

2.2.3 Концепт и основне карактеристике Индустрије 4.0

Четврта индустријска револуција (Индустрија 4.0) означава промене у привреди које су се десиле и које се дешавају под утицајем достигнућа у области технологије. Сам термин Индустрија 4.0 први пут се помиње 2011. године у Немачкој (Kagermann, Wahlster & Helbig, 2013), па се ова година уједно сматра и њеним почетком. Мада је Индустрија 4.0 првобитно окарактерисана као и прве три индустријске револуције и подразумевала пре свега развој који се десио у производној индустрији, концептуализација Индустрије 4.0 је еволуирала и данас укључује дигиталну трансформацију целокупног индустријског и потрошачког тржишта (Schroeder, et al., 2019). У теорији не постоји консензус око једне заједничке дефиниције овог термина (Liao et al., 2017), али се Индустрија 4.0 неретко описује као социо-техничка парадигма која зависи од интеграције информационих и комуникационих технологија са аутоматизацијом у циљу интеграције система у целокупном ланцу вредности (Kagermann, Wahlster & Helbig, 2013). Индустрија 4.0 ослања се на имплементацију различитих оперативних и дигиталних технологија које могу бити изузетно једноставне али и веома напредне (Ghobakhloo, 2019). Данас усвајање дигиталних технологија представља императив како би индустријски системи остали компетитивни (Fitzgerald et al., 2013; Ross, et al., 2016). Индустрија 4.0 пред индустријске системе поставља изазове са којима се морају суочити како би остварили стабилност на турбулентном тржишту. Имплементација могућности које пружа Индустрија 4.0 у један индустријски систем омогућава унапређење ефикасности, диференцијацију самог индустријског система у оквиру тржишта као и унапређење конкурентске предности.



Слика 7 Основна обележја Индустрије 4.0

2.2.3.1 Пилари индустрије 4.0

У теорији се дефинише девет пилара Индустрије 4.0 (Motyl et al., 2017; Saucedo-Martinez, Perez-Lara & Marmolejo-Saucedo, 2017):

- Интернет ствари (енг. *Internet of Things – IoT),*
- Рачунарство у облаку (енг. *Cloud Computing),*
- Анализа велике количине података (енг. *Big Data),*
- Проширена стварност (енг. *Augmented Reality – AR),*
- Адитивна производња,
- Системска интеграција (енг. *Horizontal and vertical system integration)*
- Сајбер безбедност,
- Симулација производње,
- Аутономни роботи.

Поједини аутори одређене технологије третирају као засебне пиларе, док их други посматрају као подсистеме ширих дигиталних концепата. Ово указује на одсуство јединственог теоријског оквира. Сваки од наведених пилара има значајну улогу у концепту Индустрије 4.0, али с обзиром да је предмет ове докторске дисертације усмерен на напредна роботска решења и њихову имплементацију у *Lean* индустријским системима, напредна роботска решења биће детаљније анализирани у наставку рада, док ће остали пилари бити приказани у обиму неопходном за разумевање њихове улоге у оквиру концепта Индустрије 4.0.

Интернет ствари представља мрежу у којој су „ствари“ међусобно повезане и могу да комуницирају без учешћа човека (Li, Xu, & Zhao, 2015). Интернет ствари може се постнатрати кроз одвојено дефинисање појмова „интернет“ као мреже (Alcacer & Cruz-Machado, 2019), односно „ствари“ као објеката који комуницирају (Madakam, Ramaswamy, & Tripathi, 2015). Четири слоја архитектуре интернета ствари су (Sikder et al., 2018):

- Сензори,
- Мрежа,
- Обрада података,
- Апликативни слој.

Компоненте интернета ствари које омогућавају несметано функционисање обухватају сензоре, контролере, актуаторе и окружење. Тренд примене интернета ствари у индустрији назива се „индустријски интернет ствари“ (енг. *Industrial Internet of Things – IIoT).* Индустријски интернет ствари подразумева умрежавање уређаја у индустријским системима како би се унапредиле перформансе и постигли бољи резултати рада (Khan et al., 2020). Подаци се прикупљају континуирано што омогућава праћење перформанси процеса и доношење одлука засновано на подацима.

Рачунарство у облаку подразумева извршавање активности без директног учешћа човека. Рачунарство у облаку подразумева минимизацију рачунарских ресурса и интеракције са провајдером (Aceto, Persico, & Pescape´, 2020). Некада, рачунарство у облаку дефинише се као један од слојева интернета ствари (Trappey et al., 2017). Рачунарство у облаку омогућава размену велике количине података у реалном времену и погодно је за оне индустријске системе који настоје да користе спољне ИТ ресурсе (Branco, Sa-Soares, & Rivero, 2017).

Модели услуга рачунарства у облаку су (Senyo, Addae, & Boateng, 2018):

- Инфраструктура као услуга (енг. *Infrastructure as a Service – IaaS),*
- Платформа као услуга (енг. *Platform as a Service – PaaS),*
- Софтвер као услуга (енг. *Software as a Service – SaaS).*

Ови модели могу бити коришћени као приватни, јавни, хибридни и модели заједнице (Kumar, 2019). Анализа велике количине података је пилар који подразумева анализу огромних количина прикупљених података, а који могу бити неструктурирани, полуструктурирани или структурирани. Да би се велике количине података могле анализирати потребни су значајни ресурси, како финансијских, тако и у погледу времена (Qi & Tao, 2018). Анализа велике количине података може бити веома значајна за друштвени развој читаве земље у различитим областима друштвеног живота (Mital et al., 2017; Iqbal et al., 2020). Значај анализе великих количина података произилази из могућности да се на основу њих благовремено идентификују узроци проблема и подржи процес одлучивања. Као три основне карактеристике анализе великих података у литератури се могу наћи (Hashem et al., 2015):

- Количина података која се анализира је огромна,
- Креирање, чување и анализа података су брзи,
- Не може се категоризовати у редовну релациону базу података.

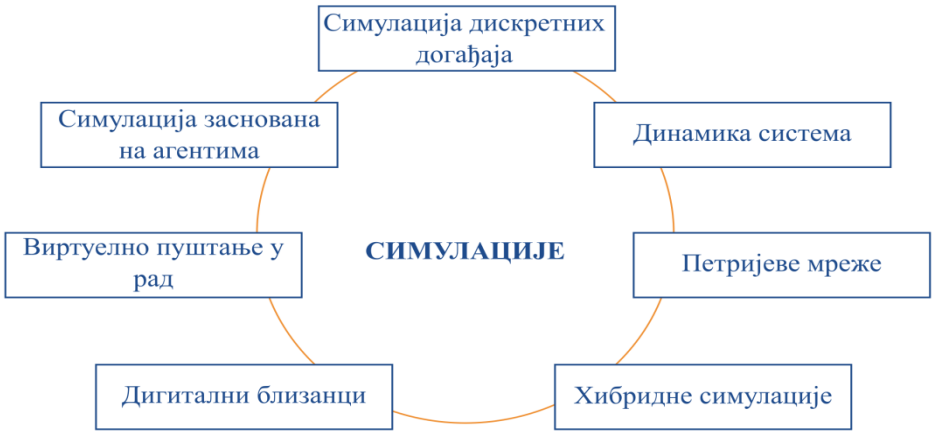
Проширена стварност подразумева комбинацију дигитално обрађене стварности и дигитално додатих вештачких објеката, који могу бити 2D или 3D објекти. Проширена стварност може се користити у различитим областима и може бити подржана од стране различитих уређаја који су мобилни, носиви, или стационирани (Rauschnabel, He, & Ro, 2018). Проширена стварност представља комбинацију стварног света и дигиталних објеката и омогућава корисницима искуство које не подразумева апсолутну изолацију од стварног света (Han et al., 2020). На тај начин, проширена стварност доприноси наглашавању позитивних исхода као што је задовољство корисника (Rauschnabel P., 2021). Проширена стварност нашла је своју примену у многим областима као и у различитим сегментима индустријског окружења.

Системска интеграција подразумева два приступа интеграцији система и може бити хоризонтална системска интеграција (интеграција више различитих система) и вертикална системска интеграција (интеграција унутар једног система) (Suri et al., 2017). Сценарији системске интеграције зависиће од степена аутоматизације као и од протока информација унутар тог система (Saucedo-Martinez, Perez-Lara, & Marmolejo-Saucedo, 2017).

Сајбер безбедност представља термин који се развио под утицајем повећаног броја сајбер напада и броја уређаја који су повезани за интернет (Alcacer & Cruz-Machado, 2019). Сајбер безбедност представља пилар који се односи на заштиту, откривање и реаговање на сајбер нападе (Piedrahita et al., 2018). Неки аутори сајбер криминал дефинишу као традиционалан злочин, као троугао: жртва, мотив, прилика (Singh, et al., 2021).

Симулација производње представља алат који има изузетно велики значај када је у питању разумевање динамике пословних система (Rodič, 2017). У индустријској пракси постоје одређени проблеми за чије решавање нису довољни стандардни математички модели, али где у великом броју случајева симулација може бити од изузетног значаја (Lachenmaier, Lasi, & Kemper, 2017). Најчешће је реч о симулацији дискретних догађаја (Tan, Cai, & Zhang, 2020). Симулација представља процес пројектовања система како би

се описало и анализирало његово понашање (Scheidegger et al., 2018). Водеће компаније у области развоја софтвера за симулацију (нпр. *Siemens*, *AnyLogic*,...) улажу значајна средства у развој решења која је могуће имплементирати у Индустрији 4.0 (Ferreira, Armellini, & De Santa Eulalia, 2020). Главна препрека у развоју софтвера за симулацију односи се на континуирани раст сложености система које је потребно моделирати (Tao et al., 2018).



Слика 8 Врсте симулација

Симулација дискретних догађаја односи се на симулацију оних догађаја у којима се промене стања система дешавају у дискретним временским тачкама у којима се појављује и догађај (Banks, 1998). Ниво апстракције је низак до средњи.

Динамика система подразумева анализу система током времена, при чему се за дефинисање односа у систему користе диференцијалне једначине и дијаграми петљи (Scheidegger et al., 2018). Ниво апстракције је висок (Borshchev, 2013).

Петријеве мреже представљају графички али и аналитички алат. За симулацију система Петријеве мреже користе дискретне догађаје (Pisching et al., 2018).

Хибридне симулације су симулације које подразумевају комбинацију две или више метода симулације (Brailsford et al., 2019).Најчешће сам термин „хибридне симулације“ аутори користе како би дефинисали нови модел симулације који су креирали.

Дигитални близанци представљају методу симулације која подразумева приказ физичког система у дигиталном свету и омогућавање увида у начин кретања „близанца“ заснован на историјским подацима, подацима сензора и физичком моделу (Tao et al., 2019).

Виртуелно пуштање у рад подразумева симулацију новог производног процеса у виртуелном окружењу (Lechler et al., 2019). Виртуелно пуштање у рад може бити засновано на широком спектру различитих технологија и омогућава увид у начин рада система пре физичког пуштања у рад.

Симулација заснована на „агентима“ подразумева један новији вид симулације сложених система. Скуп софтверских јединица које раде независно и могу да прате неке одређене циљеве представљају „агента“ (Abar et al., 2017). Овај вид симулације укључује пре свега агенте, затим околину али и односе између агената.

Без обзира на методу која се користи, симулација у Индустрији 4.0 може бити изузетно корисна, посебно када је у питању оптимизовање процеса доношења одлука. Избор одговарајућег приступа зависи од природе проблема, нивоа детаљности и циљева истраживања. Без обзира на изабрану методу, симулација представља подршку доношењу одлука у савременим индустријским системима.

2.2.4 Утицај Индустрије 4.0 на *Lean* индустријске системе

Lean индустријски системи и Индустрија 4.0 дуго су се посматрали као два независна приступа за унапређење производних система. Док је *Lean* оријентисан на елиминацију губитака и стандардизацију процеса, Индустрија 4.0 као приоритет има дигитализацију и примену савремених информационих и комуникационих технологија (Buer, Strandhagen, & Chan, 2018). Последњих година ова два концепта сматрају се комплементарним у све већем броју истраживања. Ова истраживања указују на то да интеграција *Lean*-а и Индустрије 4.0 омогућава постизање значајно бољих резултата него њихова независна имплементација (Kolberg & Zuhlke, 2015). Без обзира на синергијске ефекте интеграције *Lean* принципа и технологија Индустрије 4.0, већина истраживања бави се ефектима након имплементације дигиталних технологија. Значајно мањи број радова у обзир узима сам процес доношења одлуке о технолошком решењу, процени оправданости и управљању ризицима инвестиције. С обзиром на то, ова област представља истраживачки изазов савремених *Lean* индустријских система.

Индустрија 4.0 омогућава брже идентификовање активности које додају вредност и анализу великих количина података, чиме се значајно повећава могућност откривања узрока губитака и доношења одлука заснованих на подацима (Sanders, Elangeswaran, & Wulfsberg, 2016). Савремени индустријски системи користе велики број сензора који прате стање машина и опреме и идентификују одступања, предвиђају кварове и анализирају производне токове (Kamble, Gunasekaran, & Sharma, 2018). У складу са тим, термином *Lean 4.0* означава се интеграција *Lean* принципа и технологија Индустрије 4.0. Полазна претпоставка концепта *Lean 4.0* је да дигиталне технологије не могу унапредити перформансе производног система уколико претходно нису елиминисани основни губици а процеси стандардизовани. *Lean* у том смислу треба да представља основу дигиталне трансформације, док Индустрија 4.0 представља средство за даље унапређење *Lean* система (Tortorella & Fettermann, 2017). Индустрија 4.0 не представља замену за *Lean* филозофију већ се технологије Индустрије 4.0 у *Lean* индустријске системе треба уводити када су основни *Lean* принципи успостављени а процеси стандардизовани (Dombrowski, Richter, & Krenkel, 2017).

Са становишта *Lean* индустријских система једна од најзначајнијих технологија Индустрије 4.0 су индустријски и колаборативни роботи. Имплементација индустријских и колаборативних робота омогућава елиминацију оних активности које не додају вредност, смањење оптерећења оператера као и смањење варијабилности. Међутим, уколико је роботско решење имплементирано у неоптимизован процес може доћи до губитака и повећање инвестиционих трошкова без унапређења перформанси (Bhamu & Sangwan, 2014). Због тога, неопходно је изабрати адекватан процес за аутоматизацију. Овако гледано, *Lean* представља методологију за идентификацију проблема, док Индустрија 4.0 даје технолошка решења за њихово отклањање. Индустријски системи који су способни да усвоје технологије Индустрије 4.0 и успешно их примене у оквиру својих производних процеса могу остварити значајну конкурентску предност (Dalenogare et al., 2018). Један од начина реализације конкурентске предности представљају флексибилност и брзина коју омогућава имплементација напредних роботских решења (Karakus, Ozturk, & Guldogan, 2021). Иако *Lean* принципи обезбеђују основу за

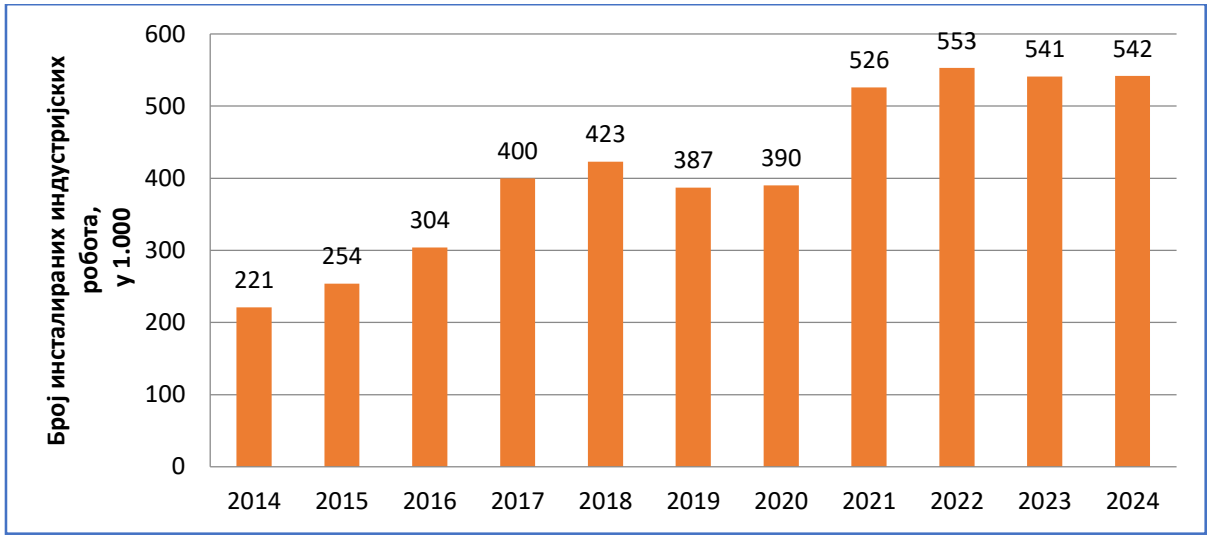
систематско унапређење производних процеса, њихова примена у условима увођења напредних роботских решења захтева додатно разматрање технолошких, организационих, економских и аспеката имплементације из угла запослених.

2.3 Напредна роботска решења

Роботска решења представљају једну од кључних технологија дигиталне трансформације индустријских система. Њихова примена обухвата широк спектар производних окружења. Роботи у индустрији данас представљају тренд који расте из дана у дан (Singh & Banga, 2022).

Роботика представља инжењерску дисциплину која подразумева коришћење робота како би се најразличитији задаци аутоматизовали (Xie, 2003). Први пут термин „робот“ јавља се 1921. године. Овај термин први је употребио *Karel Capek (1890-1938),* чешки писац, у наслову своје књиге *„Rossum's Universal Robots (R.U.R.),* која даје преглед класне борбе у друштву са аутоматизованим радницима (Grau et al., 2021), односно помоћним радницима у ропству.

На слици 9 приказан је тренд инсталирања роботских решења на годишњем нивоу.



Слика 9 Број инсталираних роботских решења на годишњем нивоу (IFR, 2025)

Роботика представља инжењерску дисциплину која подразумева коришћење робота како би се најразличитији задаци аутоматизовали (Xie, 2003). Први пут термин „робот“ јавља се 1921. године. Овај термин први је употребио *Karel Capek (1890-1938),* чешки писац, у наслову своје књиге *„Rossum's Universal Robot (R.U.R.),* која даје преглед класне борбе у друштву са аутоматизованим радницима (Grau et al., 2021), односно помоћним радницима у ропству. Дефиниција роботике подразумевала је раније имплементацију роботских решења како би се обављали механизовани задаци или низ задатака у циљу повећања резултата људског напора (Caroll, 2021), али је та дефиниција измењена под утицајем етичких норми. Иако не постоји општеприхваћена дефиниција индустријских робота, неке које су установљене од водећих међународних организација у области роботике дате су у табели 2.

Табела 2 Дефиниције индустријских робота

Организација	Дефиниција
Међународна организација за стандардизацију	*„Индустријски робот је репрограмабилни вишефункционални манипулатор пројектован да се помера у три или више оса и може бити фиксиран на месту или мобилан за употребу у индустријским системима“*
Амерички институт за роботику	*„Индустријски робот је програмабилни мултифункционални оператер за руковање механичким деловима или радним комадима, или посебан механички уређај који може да обавља различите задатке променом програма“*
Јапанско удружење за роботику	*„Индустријски робот представља механички систем који има функције флексибилног кретања аналогне живим организмима или комбинацију таквих функција кретања са интелектуалним функцијама које могу укључивати препознавање, прилагођавање, учење или просуђивање или било коју њихову комбинацију“*
Британско удружење за роботику	*„Индустријски робот представља репрограмабилни уређај дизајниран за манипулацију и транспорт делова, алата или специјализованих производних алата кроз варијабилне програмиране покрете за обављање специфичних производних задатака“*

Значајно за све дефиниције јесте да се индустријски робот посматра као репрограмабилан систем који може да извршава различите производне задатке уз висок степен флексибилности.

Индустријски системи данас стављају фокус на унапређење свог пословања у сегменту ефикасности, продуктивности али и оптимизације процеса. Са друге стране, тржишта на којима се обављају пословне активности изузетно су турбулентна и у циљу одржавања конкурентске предности неопходно је доношење многих сложених одлука (Battaia et al., 2018). Један индустријски систем моћи ће да реализује све комплексне захтеве који се пред њега стављају уколико ради на иновирању својих процеса (Gunday et al., 2011), производа (Bernard, Redding, & Schott, 2010), али и унапређењу технолошких капацитета (Luintel, Khan, & Theodoridis, 2014).

Развој и све већа распрострањеност концепта Индустрије 4.0 довела је до тога да роботска решења имају изузетно широку примену у индустријским системима. Иако се имплементације технолошких решења Индустрије 4.0 најчешће врши са циљем унапређења квалитета или смањења трошкова, ови технолошки напретци могу значајно допринети конкурентској предности омогућавајући флексибилнију и бржу производњу (Karakus, Ozturk, & Guldogan, 2021). Редовна обрада обимних података који се могу прикупити доприноси континуираном унапређењу ефикасности у оквиру једног индустријског система (Lipson, 2014). Уколико се роботска решења користе у складиштима паметних фабрика методологија навигације испраћена је структуром која омогућава безбедно кретање применом теорије надзорног управљања, децентрализацију кретања робота и могућност имплементације у другим окружењима (Huang & Mok, 2018). Индустријски системи ослањају се на напредна роботска решења како би се нагласио значај безбедности, прилагодљивости и сарадње (Nayyar & Kumar, 2020). Због недостатка радне снаге на појединим пословима, од изузетног значаја за један индустријски систем је да радну снагу користи на оптималан начин (Fox & Smeets, 2011). Имплементација роботских решења у том смислу идеална је на оним пословима који су опасни, физички захтевни, понављајући или ризични (Esmaeilian, Behdad, & Wang, 2016; Chauhan, Singh, &

Luthra, 2021). Роботска решења се такође примењују и на оним задацима који су монотони и на тај начин даје се простор радницима да обављају активности са већим задовољством (Adbirad, Krishnan, & Gupta, 2021), што уједно доприноси бољем искоришћавању креативног потенцијала запослених. Из *Lean* перспективе, значајно је да роботи раде без паузе, а задатке могу обављати брже и прецизније од људи што утиче на скраћивање времена циклуса и смањење губитака захваљујући елиминисању грешака (Tao et al., 2018). Вредност роботских решења не огледа се искључиво у замени људског рада, већ у способности да елиминишу активности које не додају вредност и обезбеде стабилнији ток производње.

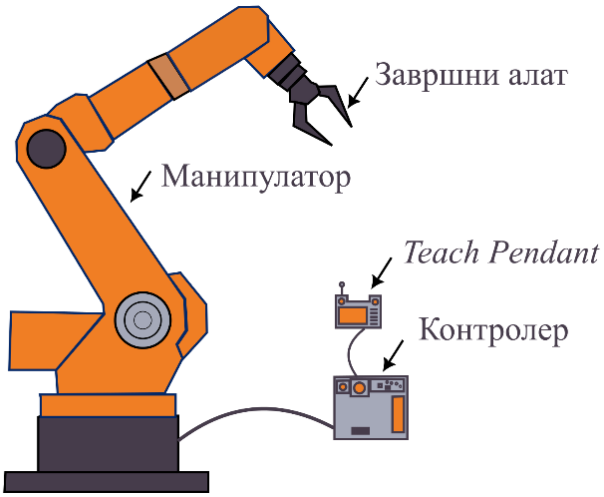
2.3.1 Индустријски роботи

Континуирана аутоматизација производног процеса доводи до све сложенијих захтева у виду функција и области примене роботских решења у индустрији. Послови за које се најчешће користе роботска решења у индустрији су:

- Послови премештања радних делова са једног на друго место (енг. *Pick and place*). У ову категорију могу се сврстати и послови палетирања и депалетирања за које постоје наменски роботи.
- Послови опслуживања машине који су најчешће у вези са растерећењем радника од обављања великог броја понављајућих операција.
- Извршавање производних операција као што су заваривање, брушење, полирање,...
- Послови монтаже у циљу унапређења ефикасности и продуктивности, а уједно и смањења трошкова.
- Контрола производа која може подразумевати контролу физичких или функционалних карактеристика.

Индустријски роботи имају четири основне компоненте (слика 10):

- Манипулатор,
- Контролер,
- *Teach Pendant,*
- Завршни алат.



Слика 10 Основне компоненте индустријских робота

Познавање основних компоненти индустријског робота има практичан значај приликом избора роботског решења јер директно утиче на функционалност, сложеност интеграције и укупне инвестиционе трошкове.

Манипулатор се односи на саму физичку структуру робота. Контролер укључује извор напајања, сензоре, функције програмирања, излазне и друге команде. *Teach Pendant* представља уређај који омогућава ручно подешавање рада робота. Завршни алат се налази на крају руке робота и његов одабир зависи од самог радног задатка робота.

Параметри робота имају велики значају одређивању роботског решења које ће бити имплементирано у једном индустријском систему. Основни параметри робота су:

- Број степени слободе,
- Носивост,
- Домет,
- Тежина робота,
- Брзина робота,
- Поновљивост и тачност.

Приликом избора индустријског робота неопходно је анализирати више техничких параметара који одређују могућност примене робота у конкретном производном процесу. Избор робота чије карактеристике нису усклађене са захтевима задатка може довести до повећања инвестиционих трошкова, смањења продуктивности или чак неуспешне имплементације.

Број степени слободе у општем случају представља број независних променљивих које одређују кретање и положај механичког система у простору. Степени слободе зависе од ротационог и транслационог кретања. У тродимензионалном простору број степени слободе може бити до шест. Зглобови робота ограничавају степене слободе робота. У табели 3 је дат преглед броја степени слободе које обезбеђују различити зглобови робота.

Табела 3 Број степени слободе у зависности од врсте зглоба робота

Зглоб	Број степени слободе	Опис
Ротациони	1	Ротација око осе зглоба
Линеарни	1	Линеарно кретање између две карике
Универзални	2	Ротација око осе нагиба и осе котрљања
Сферни	3	Два степена слободе зглоба плус окретање око осе
Цилиндрични	2	Транслација и ротација око једне осе зглоба, независне
Хеликални	1	Спаја два крута тела између којих је 1 степен слободе

Носивост представља највеће могуће оптерећење за неку конфигурацију робота (Roth, 1983). Ово максимално оптерећење може се дефинисати као статички носиви капацитет. Када је реч о стварној носивости робота, она представља минималну вредност статичког капацитета током кретања робота (Wang & Ravani, 1988). Када се посматра и кретање робота, носивост представља максимално оптерећење које манипулатор може да носи при поштовању прецизности робота унутар дефинисане путање. С обзиром да се у индустрији користе роботи који све више теже лакој конструкцији, од изузетног значаја је тачно познавање корисног оптерећења како би се оптимизовали задаци које робот извршава (Watanabe, 2011). Како се дефинисање носивости робота односи на тежину коју може да подржи зглоб робота, неопходно је приликом одабира робота узети у обзир не само тежину радног комада већ и завршног алата (енг. *Gripper*).

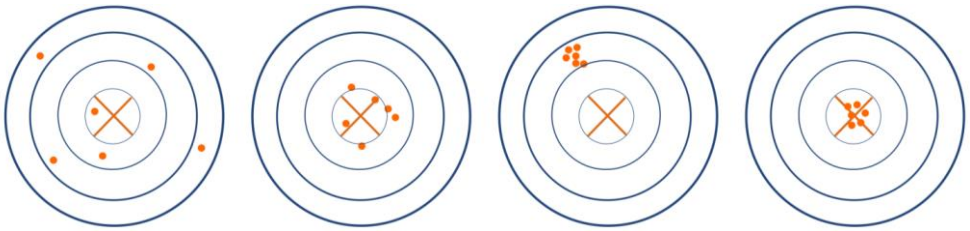
Домет робота одређује радни простор робота. Када се доноси одлука о имплементацији роботског решења у неком индустријском систему веома је битно да домет буде у складу са захтевима мануелног радног задатка који се аутоматизује како би

радни комад могао бити обрађен у складу са захтевима. Домет робота може се односити на хоризонтални домет и вертикални домет.

Тежина робота најчешће се изражава у килограмима. Сама тежина робота приликом одабира роботског решења у индустријском систему може бити од значаја уколико се робот инсталира на место на коме његова тежина не сме да прелази одређени ниво.

Брзина кретања робота односи се на време које је потребно роботу да дође у задати положај. Брзина кретања робота може се посматрати као линеарна, угаона или комбинована брзина.

Поновљивост робота односи се на његову способност да дође до одређене тачке доследно сваки пут приликом извршења задатка. Мера грешке између тачке до које робот треба да дође и тачке до које робот заиста долази представља тачност. Често аутори наводе да може постојати проблем приликом избора адекватног робота за имплементацију у индустријском систему због недостатака информација о поновљивости и тачности робота (Mehrez, Hu, & Offodile, 1996; Nzue et al., 2010). На слици 11 (Joubair, 2021) приказани су различити случајеви поновљивости и тачности робота и то следећим редом: лоша поновљивост и лоша тачност, лоша поновљивост и добра тачност, добра поновљивост и лоша тачност, добра поновљивост и добра тачност.



Слика 11 Могуће комбинације поновљивости и тачности индустријских робота

Одабир завршног уређаја робота не спада у параметре робота али доношење ове одлуке такође има велики значај. Одабир завршног уређаја зависиће од задатка који робот треба да извршава. Завршни уређај робота омогућава да се рукује са радним делом и као такав представља неопходну компоненту (Reddy & Suresh, 2013). У пракси најчешће се користе механички системи који имају један степен слободе (Hassan & Abomoharam, 2017). У општем случају завршни уређај робота може бити хватаљка, алат или мерно-контролни уређај.

Примери хватаљки дати су на сликама 12, 13, 14, 15, 16 и 17.



Слика 12 Механичка хватаљка са прстима [3]



Слика 13 Дупла хватаљка [4]



Слика 14 Вакуумска хватаљка [5]

[3] Слика преузета са https://manganorobot.rs/3fg15-griper-sa-tri-prsta/

[4] Слика преузета са https://www.industrysearch.com.au/what-are-the-benefits-of-automating-with-cobots/f/24254

[5] Слика преузета са https://tech-labs.com/products/vgp20-electric-vacuum-gripper



Слика 15 Магнетна хватаљка [6]



Слика 16 Адхезивна хватаљка [7]



Слика 17 Универзална хватаљка [8]

Механичка хватаљка (слика 12) са прстима може имати два или више „прста“. Прсти хватаљке активирају се преко контролера робота. Иста хватаљка може се користити за различите делове с обзиром на могућности прилагођавања. Осим обичних постоје и дупле хватаљке (слика 13) које се користе када постоји потреба или могућност манипулисања са два радна дела у истом тренутку. Ово омогућава скраћивање времена циклуса (Reddy & Suresh, 2013). Такође, постоје и вакуумске (слика 14), магнетне (слика 15) и адхезионе хватаљке (слика 16). Овакви типови хватаљки имају могућност манипулисања радним делом „залепљивањем“ за њега. Још неки од завршних алата робота су универзална хватаљка (слика 17) која може да се прилагоди различитим радним деловима и хватаљка са сензорима. Хватаљка са сензорима омогућава повратну информацију о сили хватања и као таква погодна је за коришћење у раду са осетљивим и ломљивим радним деловима.

Анализа техничких карактеристика робота показује да избор адекватног роботског решења представља вишекритеријумски проблем. Поред техничких параметара као што су носивост, домет, брзина и поновљивост, неопходно је истовремено разматрати и карактеристике производног процеса, очекиване ефекте аутоматизације и економску оправданост инвестиције. Управо због великог броја међусобно зависних критеријума избор роботског решења не може се заснивати искључиво на техничким спецификацијама произвођача, већ захтева систематичан приступ доношењу одлуке. У зависности од задатка на коме је ангажован робот у индустријском систему зависиће и одабир адекватног типа робота.

Индустрија робота најчешће дефинише следеће типове индустријских робота (Wilson, 2015):

- Зглобни роботи
- SCARA роботи
- Картезијански роботи,
- Делта роботи,
- Цилиндрични роботи,
- Колаборативни роботи.

Зглобни роботи се користе за производне операције (заваривање, брушење,...) али и за руковање материјалом и алатом. Домет и носивост ових робота имају веома велики опсег. Њихова конфигурација подсећа на руку човека, веома је флексибилна и омогућава роботу да приђе тачкама у радном простору из више углова. Ови роботи могу имати до шест степени слободе. Зглобови имају ротационо кретање.

[6]Слика преузета са https://onrobot.com/en/products/mg10

[7]Слика преузета са https://onrobot.com/en/products/gecko-gripper

[8]Слика преузета са https://www.axysto.com/products/rg2-flexible-2-finger-gripper

SCARA (енг. *Selective Compliance Articulated Robot Arms*) роботи првобитно су развијени за обављање послова монтаже. Данас се најчешће користе за послове премештање радних делова са једног на друго место. Ови роботи имају четири степена слободе. SCARA роботи могу да обављају задатке на којима су ангажовани веома брзо па су ови роботи погодни за имплементацију онда када је време циклуса најкритичнији сегмент. Радни простор ових робота је цилиндричног облика. Овај тип робота такође има добре перформансе када је у питању поновљивост.

Картезијански роботи се најчешће имплементирају у циљу обављања задатака руковања материјалом и контроле машина за утовар/истовар (Sharma, 2017). Картезијански роботи су роботи који имају искључиво линеарано кретање по три главне осе (x, y, z), што значи да имају три степена слободе. Ови роботи могу се кретати у простору од пола до три ипо метра и имати носивост и преко хиљаду килограма. Радни простор картезијанског робота је у облику коцке.

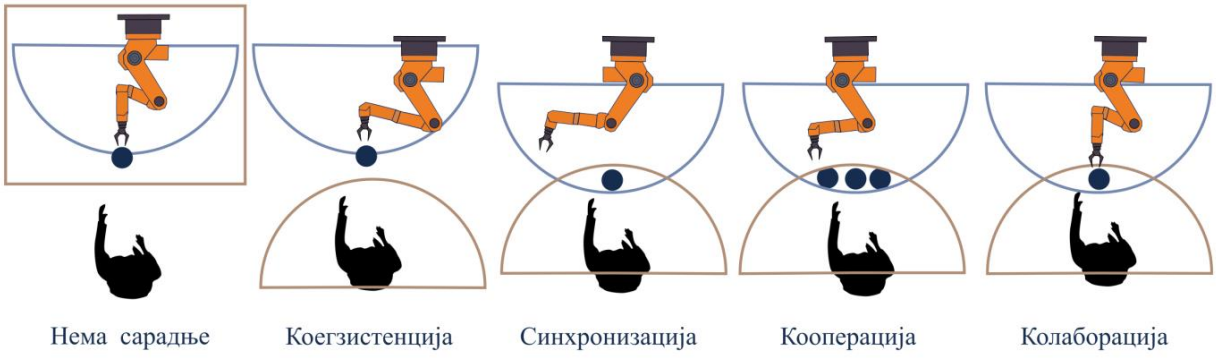
Делта роботи су конфигурисани тако да њихова лагана структура омогућава брзо извршење задатака. Углавном се користе за *„pick and place“* послове. Најчешће се састоје од више призматичних спојева који су повезани у завршном алату. Због присуства нелинеарних елемената и интеракције између роботских веза, често су изазовни када је у питању пројектовање. Делта роботи састоје се од фиксне и мобилне платформе и најчешће имају три степена слободе.

Цилиндрични роботи имају три зглоба, и то један са ротационим и два са транслационим, односно линеарним кретањем. Цилиндрични роботи имају круту структуру али су једноставни за програмирање. Најчешћа примена ових робота је у електронској индустрији.

2.3.2 Колаборативни роботи

Роботска решења и аутоматизација процеса у индустрији умногоме су допринели измени производних процеса (El Zaatari et al., 2019). Аутоматизоване линије почеле су да се користе током Треће индустријске револуције, а до краја XX века свако имплементирано роботско решење у индустријском систему деловало је изоловано и независно од других производних ћелија. Напредак у имплементацији роботских решења у индустријским системима постигнут је пре свега на нивоу сарадње човека и робота. Уз све напретке у овом сегменту до дељења простора између робота и оператера дошло је тек почетком XXI века (Stengel et al., 2010). Данас се дефинише пет различитих нивоа сарадње робота и човека (Oliveras-Alarcos, Foix, & Alenya, 2019), а приказани су на слици 18:

- Између човека и робота нема никакве сарадње,
- Коегзистенција,
- Синхронизација,
- Кооперација,
- Колаборација.



Слика 18 Нивои сарадње између робота и човека; прилагођено (Malik & Bilberg, 2019)

Када не постоји сарадња између човека и робота, робот се налази у потпуно засебној радној ћелији и није могуће остварење контакта између човека и робота.

Коегзистенција подразумева уклањање засебне роботске ћелије, што значи да између човека и робота више не постоји никаква физичка препрека. Без обзира на непостојање физичке препреке, између човека и робота не постоји дељење радног простора.

Синхронизација је облик сарадње човека и робота који постоји уколико човек и робот деле радни простор. Специфичност синхронизације огледа се у томе што човек и робот не раде истовремено већ у радном простору раде у различитим временским тренуцима.

Кооперација постоји када између човека и робота постоји подела простора и они у радном простору раде у истом тренутку. Исти случај постоји и у случају колаборације, човек и робот у радном простору раде у истом временском тренутку. Кључна разлика огледа се у томе што у случају кооперације не постоји физичка сарадња између њих, док колаборација подразумева апсолутну сарадњу.

У модерним индустријским системима имплементација роботских решења углавном подразумева колаборацију између човека и робота, односно имплементацију колаборативних робота (Kadir et. al., 2018; Raza, Malik, & Bilberg, 2021). Колаборативни роботи су у односу на традиционално коришћена роботска решења изузетно компатибилни, флексибилни (Holm & Schnell, 2022), једноставни за употребу и програмирање (Pieska, Kaarela, & Makela, 2018).

Осим унапређења робота у погледу могућности и степена интеракције са човеком постоји тенденција проширења спектра задатака које робот може да извршава захваљујући интеграцији додатне опреме. Један од задатака који роботи могу да обављају уз интеграцију додатних сензорних технологија, фото или видео анализа јесте препознавање објекта и даље руковање њиме, селектовање или обављање неке друге активности. Развој могућности препознавања објекта од стране робота углавном се заснива на техникама дубоког учења (енг. *Deep Learning*) (Shubha, 2020). Вештачка интелигенција омогућава и манипулисање са радним објектима чак и у срединама које нису строго контролисане (Galin & Meshcheryakov, 2019).

Најчешће се за кретање робота користе сензори, ротациони ласери и компјутерска визија. Унапређење серво мотора и могућности манипулације омогућава примену робота и у складиштима и на пословима испоруке. Како се област роботике све више развија, то су и истраживања, као и практична примена различитих роботских решења у

индустријским системима диверзификованија. Активности на којима је данас могуће имплементирати напредна роботска решења крећу се од најједноставнијих *„pick and place“* задатака, преко сечења, уклањања вишкова материјала и монтирања, али могу бити и изузетно захтевне по питању прецизности и поновљивости. Поред тога, захваљујући све већој интеграцији роботских решења која се примењују у индустријским системима, људски ресурси су усмерени на извршавање профитабилнијих послова (Xiao et al., 2020), а фокус на креативне задатке доприноси већем задовољству на нивоу целог система (Li et al., 2020).

Развој колаборативних робота значајно је проширио број операција које је могуће аутоматизовати. Ово отвара нове могућности за постепену роботизацију *Lean* производних система, а један од највећих изазова је избор одговарајућег процеса у коме ће примена колаборативног робота обезбедити највећи ефекат.

2.3.3 Аутономни мобилни роботи

Аутономни роботи су од изузетне важности у данашњим индустријским системима како би се реализовали циљеви постављени у вези са потражњом и флексибилношћу захтева који су све сложенији (Pedersen, et al., 2016). Аутономни роботи способни су да без директне асистенције човека своје понашање ускладе са окружењем и променама у њему (Watson & Scheidt, 2005). Аутономни роботи представљају један од облика вештачке интелигенције (Salkin et al., 2018). Да би аутономни роботи функционисали неометано у свом окружењу потребне су им информације, чијом ће обрадом моћи да доносе интелигентне одлуке. Роботи информације о окружењу у коме се налазе могу добити коришћењем сензора (Nikolić et al., 2025). Након генерисања информација, информације се обрађују у процесору (једном и више) и на основу тога актуаторима се шаљу сигнали (Mattias, 2016).

Данас се примењује велики број различитих роботских решења која имају широк спектар карактеристика, цена и апликација, али се у општем случају може дефинисати ужи скуп од шест категорија робота (Intel):

- Аутономни мобилни роботи (енг. *Autonomous Mobile Robots- AMRs*),
- Аутоматски вођена возила (енг. *Automated Guided Vehicles - AGVs*),
- Зглобни роботи (енг. *Articulated Robots*),
- Хуманоидни роботи (енг. *Humanoids*),
- Колаборативни роботи (енг. *Cobots*),
- Хибридни роботи (енг. *Hybrids*).

Аутономни мобилни роботи за кретање и доношење одлука користе сензоре и камере. Ова решења су мобилна, али како би извршавали задатке захтевају ограничено учешће човека.

Аутоматски вођена возила крећу се на основу путања које су унапред дефинисане и у употреби су најчешће у контролисаним окружењима где их надгледа оператер.

Зглобни роботи подсећају на људску руку и најадекватнији су за руковање материјалом, паковање, одржавање,... Ови роботи могу имати до десет зглобова који се ротирају.

Хуманоидни роботи најчешће се израђују у људском облику и њихове активности су усмерене на човека.

Колаборативни роботи се често користе како би обавили задатке који су напорни или опасни за човека. Конструисани су на начин да могу да раде заједно са човеком.

Хибридни роботи представљају комбинацију више типова робота како би се извршили неки сложенији задаци.

Значајан напредак забележен је и у сегменту кретања робота кроз простор у коме обављају радне задатке. Аутономни мобилни роботи су у могућности да увиђају и избегавају препреке као и да одреде или модификују своју путању али и креирају друге предиктивне моделе у реалном времену (Sharma et al., 2021).

Аутономни мобилни роботи имају значајну улогу у *Lean* индустријским системима када је реч о елиминацији транспортних губитака и смањењу времена чекања између операција. Оправданост имплементације ових роботских решења такође зависи од правилног избора процеса који ће се аутоматизовати.

2.3.4 Критеријуми избора и параметри роботских система

Приликом имплементације, избор роботског решења представља једну од веома битних одлука. Иако на тржишту постоји велики број роботских решења, њихове техничке карактеристике, функционалности и области примене значајно се разликују. Одлука о роботском решењу мора да се заснива на карактеристикама процеса, захтевима производног система и очекиваним ефектима имплементације.

Успешност роботизације зависи у највећој мери од адекватног избора процеса који ће бити аутоматизован а онда и од правилног избора самог роботског решења. Због тога избор роботског решења представља мултикритеријумски проблем који укључује техничке, производне, економске и организационе карактеристике.

Иако се избор роботског решења посматра пре свега као технички проблем, у реалности избор процеса који ће бити аутоматизован представља далеко компликованији проблем. Уколико одабран процес није адекватан то може довести до смањених резултата чак и уколико је реч о технички оптималном роботском решењу.

На избор роботског решења утичу пре свега производне операције, сложеност задатака, трајање циклуса, варијабилност процеса, број смена, неопходна прецизност и очекивани производни капацитет. Најпогоднији кандидати су процеси код којих оператер током већег дела радног времена извршава исте покрете, док су процеси који захтевају промене производа и доношење сложених одлука значајно тежи и често економски неоправдани за аутоматизацију. Брзина извршавања операције од стране робота мора бити усклађена са производним капацитетом. Робот не сме да буде уско грло, а такође не треба бити предимензионисан како не би дошло до непотребно високе инвестиције без довољног повећања производних перформанси. Приликом избора роботског решења морају се анализирати расположив простор, влажност, присуство прашине, агресивних хемијских супстанци, вибрација као и захтеви у погледу безбедности рада.

Поред техничке, имплементација роботског решења мора бити и економски оправдана. Приликом избора роботског решења анализирају се инвестициони трошкови, трошкови интеграције, експлоатације и одржавања, период поврата инвестиције, као и утицај на продуктивност, квалитет и производне трошкове. Може се рећи да параметри робота зависе од карактеристика процеса (табела 4).

Табела 4 Параметри робота у односу на карактеристике процеса

Карактеристика процеса	Параметар робота
Маса предмета	Носивост
Величина дела	Домет
Прецизност	Поновљивост
Број варијанти	Степени слободе
Рад са човеком	Колаборативни робот

Наведени параметри користе се приликом избора конкретног роботског решења, али претходно мора бити идентификован процес који је погодан за роботизацију. Другим речима, техничка селекција робота долази тек након стратешке одлуке о томе које активности треба аутоматизовати.

Такође, савремена роботска решења могуће је реализовати као флексибилне роботске станице које интегришу робота, периферну опрему, системе управљања и дигиталне технологије у јединствен производни систем. Међутим, успешност оваквих решења не зависи искључиво од избора робота већ пре свега од правилног избора процеса који ће бити роботизован, као и од усклађености техничких карактеристика роботског система са захтевима производног процеса.

2.3.5 Флексибилна роботска станица

Данас производни системи све више теже флексибилности као одговору на све краћи животни циклус и већу варијабилност производа. Концепт флексибилних производних система *(eng. Flexible Manufacturing Systems – FMS)* има за циљ омогућавање производње различитих делова у оквиру истог система. Флексибилни производни системи омогућавају флексибилност, али су са друге стране често ограничени у погледу скалабилности и брзине прилагођавања структуре система (El Marghy & Cahhiano, 2019). Као одговор на ово ограничење развијени су реконфигурабилни производни системи *(*енг. *Reconfigurable Manufacturing Systems – RMS)* који омогућавају брзе промене структуре система, капацитета и функционалности (Koren, Gu, & Guo, 2018). Ови системи омогућавају брзу реконфигурацију хардвера и софтвера и утичу на постизање баланса између високе продуктивности и флексибилности. Када се посматрају роботска решења, савремени трендови стављају акценат управо на концепт реконфигурабилних модуларних радних ћелија. У оквиру овог развоја, у овом раду се користи појам флексибилне роботске станице *(eng. Flexible Robotic Station - FRS).* Флексибилна роботска станица представља модуларну роботску производну станицу која може да извршава више различитих производних операција уз минималне хардверске и софтверске измене. На овај начин омогућава се брза адаптација различитим варијантама производа и процеса. Флексибилна роботска станица интегрише принципе модуларности и реконфигурабилности који су карактеристични за *RMS* парадигму. То подразумева брзу замену алата, интеграцију сензорских система, и адаптивно управљање засновано на софтверској реконфигурацији процеса. Флексибилна роботска станица представља микро ниво имплементације *RMS/FMS* концепта, са фокусом на агилност појединачне радне јединице.

Овај приступ у складу је са савременим трендовима у флексибилној и реконфигурабилној аутоматизацији, где постоји наглашена потреба за системима који брзо мењају своју структуру и функционалност у зависности од промена у производном окружењу. Овај приступ омогућава смањење времена застоја као и трошкова реконфигурације (Koren & Shpiralni, 2010).

2.4 Ограничења класичног *Lean* приступа у контексту аутоматизације

Савремено индустријско окружење карактерише висок степен дигитализације, аутоматизације, роботизације и интеграције информационих технологија. Појава нових концепата пред традиционалну *Lean* методологију ставља нове изазове. Да би један индустријски систем у данашњем глобализованом тржишту био конкурентан неопходна је бржа производња, али и прилагођавање производа потребама купаца (Jain, Garg, & Kansal, 2022; Shahin et al., 2020). *Lean* методологија се у различитим индустријама показала као адекватна за унапређење квалитета производа, међутим, постоји њено ограничење када је у питању рад са прилагођеним производима, пре свега због фиксних производних секвенци и времена циклуса (Kolberg, Knobloch, & Zuhlke, 2017). Промене у процесима, залихама или временима циклуса у традиционалном *Lean* приступу узрокују много прилагођавања и додатних активности (Dickman, 2007). Са друге стране, индустријским системима је потребно решење које ће омогућити смањење сложености и елиминисање губитака. Четврта индустријска револуција (Индустрија 4.0) омогућава индустријским системима да интегришу напредне дигиталне технологије и унапреде комуникацију и повезаност између људи, објеката и опреме (Herman, Pantek, & Otto, 2016; Tortorella, Silva, & Vargas, 2018). У том смислу, битно је нагласити да *Lean* и аутоматизација не треба да буду супротстављени концепти, већ могу бити комплементарни приступи.

Традиционални *Lean* алати идентификују активности које не додају вредност али не дају одговор на питање која активност се може дигитализовати, аутоматизовати или заменити новим технологијама како би решење било економски најисплативије. Одлуке о аутоматизацији најчешће се доносе на нивоу појединачних радних места и такве имплементације могу довести до унапређења једне операције, али истовремено створити нова уска грла у другом делу производног система. Због тога, имплементација аутоматизације без претходне анализе тока вредности може нарушити равнотежу и смањити укупне перформансе производног система. Поред тога, класични *Lean* алати најчешће приказују статичко стање система и у условима динамичких промена и великог броја различитих производа нису довољни за процену последица увођења роботских система. Најчешће, *Lean* алате је потребно комбиновати са симулационим моделима, дигиталним близанцима и другим технологијама Индустрије 4.0.

У складу са тим, *Lean* методологија поред традиционалних елемената треба да обухвати и методологије које су у складу са захтевима савремене индустрије.

2.4.1 Напредна роботска решења у *Lean* индустријским системима и изазови имплементације

Имплементацију роботских решења у *Lean* индустријским системима неопходно је реализовати на начин да се омогући адекватна сарадња између човека и робота, што наглашава и *Jidoka*. Све активности које је могуће реализовати неопходно је уравнотежити са сигурношћу. исплативошћу и дугорочним растом. Одлуке о имплементацији роботских решења у *Lean* индустријским системима потребно је базирати на стратешком размишљању и расположивим подацима, а не искључиво на техничким карактеристикама робота или очекиваном повећању продуктивности.

Иако је имплементација роботских решења у *Lean* индустријским системима тренд са континуираним растом, имплементација роботских решења се често посматра са скептицизмом (Dzedzickis et al., 2021). Једна од кључних претпоставки је смањен број

радних места за човека услед експанзије имплементације роботских решења. Иако на овом нивоу не постоји негативна корелација (Dekle, 2020) постоји недостатак позитивне конотације запослених у односу на роботе (Asatiani & Penttinen, 2016; Suri, Elia, & Hillegersberg, 2017). Технички проблеми јављају се на нивоу прилагођавања роботског решења специфичним захтевима производа (Kadir et. al., 2018; Raza, Malik, & Bilberg, 2021), а како би задатак био извршен на адекватан начин, неретко је неопходна примена додатних алата, сензора, система мерења, алгоритама, и унапређење стандардних функција роботских решења (Dzedzickis et al., 2021). На стратешком нивоу јављају се проблеми недовољно дефинисаних захтева које робот треба да извршава, места инсталације робота и индикатора перформанси које ће бити репер успешности у реализацији пројекта (Erol, Jager, Hold, Ott K., & Sihn, 2016) (Kiel, Muller, Arnold, & Voigt, 2017). Већина индустријских система сусреће се са проблемима у реализацији финансијских циљева као и ризиком због високих инвестиционих средстава која су потребна како би пројекат имплементације роботског решења био реализован (Erol et al., 2016; Kiel, Arnold, & Voigt, 2017). Кључне регулаторне дилеме везују се за одржавање корака са технолошким напретком, успостављање равнотеже са заштитом права и вредности, односа са друштвеним нормама као и односа ефективности и легитимности (Leenes et al., 2017). Значајан број проблема имплементације роботских решења јавља се због неадекватне процене потребе за роботизацијом, лоше дефинисаних циљева, или непотпуне анализе ефеката инвестиције.

Дакле, спектар проблема који се јавља у вези са имплементацијом напредних роботских решења у *Lean* индустријским системима доста је диверзификован. Велика иницијална инвестициона средства, технички проблеми, недовољан ниво реализације постављених циљева, али и апсолутно непостојање визије о начину адекватне имплементације роботских решења могу бити фатални по један индустријски систем. Уколико роботско решење није адекватно за дефинисани проблем или уколико није прецизно одређен проблем који се решава то може изазвати значајне губитке у финансијском, оперативном али и сегменту људских ресурса. Због тога, од изузетног значаја је да се роботско решење бира на систематичан начин као и да се његова интеграција од почетка до краја обави тако да индустријски систем у најкраћем временском периоду почео да реализује бенефите и у крајњој инстанци оствари своје циљеве. Адекватан приступ који ће омогућити индустријским системима да пре саме инвестиције процене оправданост имплементације роботског решења и очекиване ефекте његове примене од кључног је значаја.

Оно што је специфично за имплементацију *Lean* концепта у различитим организацијама јесте да је сам концепт погодан за имплементацију како у великим индустријским системима, тако и у малим и средњим предузећима због њихове флексибилности и ефикасног система интерне комуникације (Davenport, 1993; Wessel & Burcher, 2004). Због финансијских, техничких и временских ограничења у овим организацијама најчешће примењују само неки од *Lean* алата који су финансијски доступни и лаки за коришћење (Mathur, Mittal, & Dangayach, 2012). Најчешће коришћени *Lean* алати у овим организацијама су 5 Зашто (Chen, Li, & Shady, 2010), *Kaizen* (Deb, Chakraborty, & Bhattacharya, 2010), Мапирање тока вредности (White & James, 2014; Roth & Franchetti, 2010) (Kumar et al., 2006), Канбан (Roth & Franchetti, 2010; Abdul-Nour, Lambert, & Drolet, 1998), а њихова имплементација као елементарне циљеве има унапређење квалитета и продуктивности (Dora et al., 2013; Li, Tan, & Hida, 2011; Singh, Bhardwaj, & Sachdeva, 2009) поред елиминисања губитака, вишка инвентара и унапређење тока производње (Boughton & Arokiam, 2000; Chandandeep, 2008). Чињеница да мала и средња предузећа могу релативно успешно примењивати *Lean* принципе

свакако не значи да су спремна и за имплементацију роботских решења. Роботизација захтева технолошке промене, инвестициона средства и техничке компетенције које могу бити изузетно захтевне за мала и средња предузећа. Неки *Lean* индустријски системи такође нису спремни да се носе са сложеношћу имплементације напредних роботских решења (Sommer, 2015), почетним улагањима у хардвер или софтвер, или недостатком знања (Zhou et al., 2022). Индустријски системи могу се суочити са неизвесношћу у погледу продуктивности, повраата инвестиције, или спремности да се прихвати нова технологија.

Дакле, постоји потреба за приступом који не посматра имплементацију роботских решења као техничку инвестицију, већ као процес доношења одлуке у условима ограничених ресурса и неизвесности. У том контексту, могуће је ослонити се на постојеће концепте као што је *Lean* роботика која наглашава потребу за елиминисањем губитака који потенцијално могу настати приликом имплементације напредних роботских решења, као и за усклађивањем роботског решења са стварним потребама производног процеса.

Такође, може се повући паралела између најсавременијих технологија и њихове имплементације у тренутно окружење индустријских система са стартап подухватима, јер подразумевају идентификацију могућности, алокацију ресурса али и управљање високим ризиком. Стартап је веома ризичан, а ризик се везује за сам производ, тржиште или финансијски аспект (Chang, 2004; Sull, 2004). Стартап представља подухват који тежи скалабилном пословном моделу (Eisenmann, Ries, & Dillard, 2011), зависи од брзине тестирања пословног модела (Mcgrath & Macmillan, 1995; Osterwalder & Pigneur, 2010), и послује у неизвесним условима па је неопходно да има одржив и прилагодљив бизнис план. Сама имплементација роботских решења у *Lean* индустријске системе има сличности са стартап компанијама и захтева исте вештине како би била успешна. Ове карактеристике указују на могућност примене принципа *Lean* стартап методологије и ван контекста развоја нових пословних подухвата, посебно у ситуацијама у којима је потребно постепено тестирати технолошка решења и смањити ризик пре њихове пуне имплементације. У случају имплементације роботских решења то подразумева испитивање изводљивости, мерење резултата, коришћење података за учење као и усавршавање решења пре пуне имплементације.

Управо ове потребе представљају основ за развој приступа који повезује принципе *Lean* производње, *Lean* роботике (енг. *Lean Robotics*) и *Lean* стартап (енг. *Lean* Startup) методологије у јединствени оквир за имплементацију роботских решења у *Lean* индустријским системима.

2.5 *Lean* стартап и *Lean* роботика као методолошка основа развоја роботских система

2.5.1 Методологија *Lean* роботике

Како у теорији не постоји општеприхваћена дефиниција термина *Lean*, тешко је дати прецизну дефиницију термина „*Lean* роботика“. У складу са дефиницијама које су наведене у претходним поглављима, а односе се на термине „*Lean*“ и „роботика“, може се рећи да се термин *Lean* роботика везује за методологију која омогућава имплементацију роботских решења у производно окружење на ефикасан начин, али и за оквир који доприноси решавању проблема у производном окружењу (Jasarevic & Colomo-Palacios, 2022). Ова методологија базира се на четири основна принципа. Када је у питању дефинисање принципа *Lean* роботике, али и њихово појашњење, већина

публикација позива се на један извор, Bouchard (2017). Принципи *Lean* роботике су (Bouchard, 2017):

- Давање приоритета људима у односу на роботе,
- Фокусирање на излаз (енг. *output*) роботске радне станице,
- Минимизирање губитака,
- Развијање вештина и искоришћавање људског потенцијала.



Слика 19 Принципи Lean роботике

Први принцип подразумева аутоматизацију у производном окружењу која је усмерена на човека и тежи континуираном побољшању. Свака неизвесност која је у вези са човеком треба да буде избегнута, а кроз сарадњу са роботским технологијама компетенције човека морају да се унапреде. Овај принцип осим што указује на значај човека у производном систему, указује и на то да имплементација роботских решења не доводи до недостатка посла за човека, већ преусмерава капацитете оператера на активности којима могу додати вредност на креативнији начин.

Фокусирање на излаз роботске радне станице наглашава приступ који је оријентисан на резултат и који је усмерен на оптимизацију процеса од почетка до краја. Овај принцип промовише стварање вредности и ефикасност кроз генерисање вредности за „унутрашњег“ купца, односно наредну роботску станицу (Jasarevic & Colomo-Palacios, 2022).

Минимизирање губитака односи се на елиминисање сваког вида губитака у било ком од аспеката примене роботског решења. У *Lean* роботици губитак има исту дефиницију као што има приликом дефинисања концепта *Lean*-а.

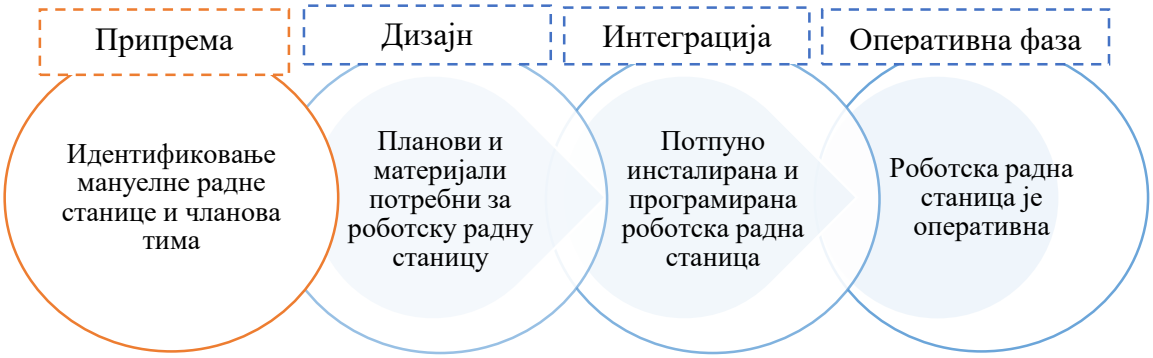
Последњи принцип односи се на развијање вештина код запослених у области роботике и тежњи ка континуираном усавршавању. Уколико постоји неискоришћен људски потенцијал приоритет је искористити га.

Ограничење *Lean* роботике пре свега се везује за усмереност методологије на имплементацију роботске станице након што је одлука о роботизацији већ донета. Сам приступ не нуди систематичан приступ идентификацији производног процеса који је најпогоднији за роботизацију. Иако указује на значај коришћења мапе тока вредности, не постоји модел који омогућава избор конкретног роботског решења у зависности од карактеристика самог процеса који се аутоматизује.

Имплементација напредног роботског решења кроз оквир *Lean* роботике обухвата три корака (Bouchard, 2017):

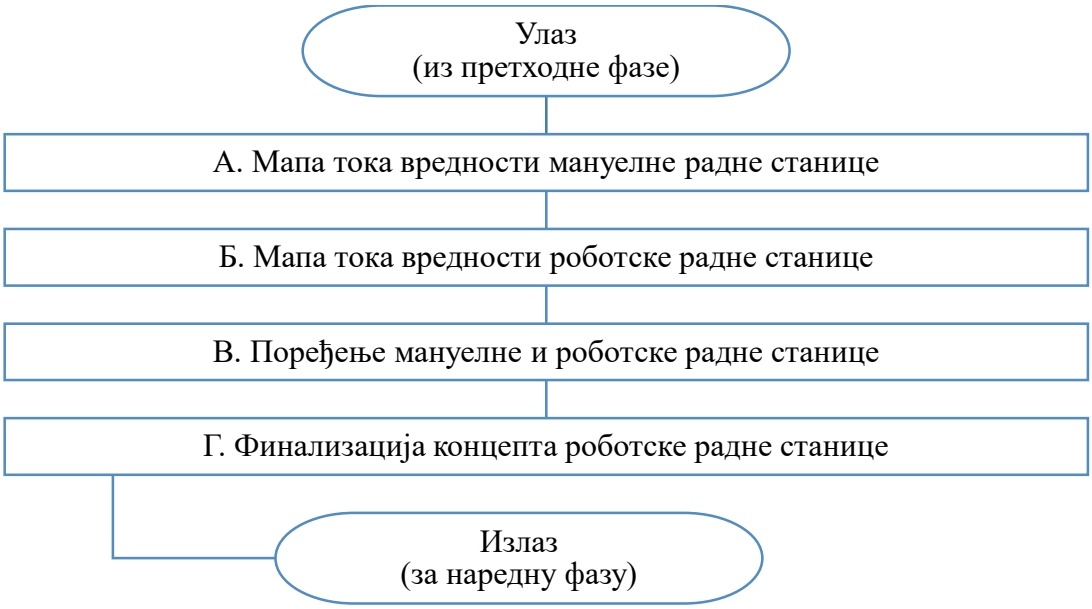
- Дизајн,
- Интеграцију,
- Оперативни део (пуштање робота у рад).

Кораци које је потребно проћи како би се развило успешно роботско решење представљени су графички на слици 20.



Слика 20 Преглед фаза развоја роботске радне станице у Lean роботици

Пре почетка спровођења прве фазе *Lean* роботике, неопходно је обавити извесне припреме унутар самог индустријског система, као што су идентификовање мануелне станице која ће бити аутоматизована, дефинисање тима ангажованог на пројекту и јасно дефинисање различитих пројектних димензија. Прва фаза, дизајн, представљена је на слици 21.



Слика 21 Резиме фазе дизајна

Када је дефинисана мапа тока вредности у случају мануелне радне станице потребно је мерење кључних индикатора перформанси како би се након имплементације роботске радне станице исти пратили и потенцијално унапредили.

Поред редовних техничких спецификација, у овој фази потребно је:

- Израчунавање повраћаја инвестиције *(*енг. *Return on Investment – ROI),*
- Минимизирање ризика,
- Коначна одлука о минималној одрживој роботској станици,
- Набавка опреме и материјала.

Циљеви се дефинишу унапред, а кључни индикатори перформанси пореде се са њима. Ризик се своди на минимум предузимањем превентивних активности, које се пре свега везују за умањење финансијских последица у будућем тренутку због лоше донетих одлука данас. Концепт минимално одрживе роботске станице одређује колико се може поједноставити пројекат а да се при томе максимизира повраћај инвестиције. Минимално одржива роботска станица подразумева имплементацију најједноставнијег роботског решења које омогућава проверу техничке и економске оправданости. Минимално роботско решење се потом постепено унапређује кроз циклусе континуираног побољшања.

Фаза интеграције укључује физичко постављање роботског решења у производни процес. Свака од ставки која се обавља у фази интеграције, од монтирања самог роботског решења, преко едукације радника и детаљног дефинисања документације извршава се у складу са *Lean* принципима и фокусом на елиминацију сваког облика расипања. Изузетан значај ставља се на агилност.

Када се на крају дође до оперативне фазе, резултат треба да буду позитивни кључни индикатори перформанси који се реализују кроз континуирани циклични ток. Уколико дође до било каквих непланираних застоја неопходно их је одмах решити како се не би стварале различите врсте губитака. Тежи се континуираном побољшању.

2.5.2 *Lean* стартап методологија

Као и термин *Lean* роботика и термин *Lean* стартап незахвално је прецизно дефинисати због непостојања превасходно јасно утврђене дефиниције обе речи које се односе на овај термин. „*Startup*“ и „*Lean*“ комбинују се у намери означавања методологије која представља систематски приступ покретању и ширењу предузећа (или пословног подухвата) са имплементацијом принципа *Lean*-а у стартап активности (Ries, 2011). Специфичност овог концепта налази се у чињеници да се принципи *Lean*-а не примењују директно на стартапове већ се прилагођавају окружењу у којем настају стартапови. Кључ ове методологије базира се на научној валидацији постављених хипотеза кроз непосредну интеракцију са купцима (Blank & Dorf, 2012). Ова методологија омогућава стартаповима да валидирају пословни модел захваљујући брзим итерацијама.

Када је реч о новом производу или пословном подухвату на тржишту, методологија *Lean* стартап заговара значај презентовања производа купцима наспрам прављења планова. Након представљања производа купцима једна компанија може много да научи и на основу повратних информација у значајном сегменту унапреди производ који развија тако да он у већој мери задовољава стварне потребе купаца (Felin et al., 2020). Производ не треба да буде своја крајња верзија већ да задовољава неке функционалности на основу којих је могуће потврдити или оповргнути хипотезе. Овај приступ умногоме омогућава компанијама да брже уче (Ries, 2011) и реализују позитивне резултате на основу проверених чињеница. Методологија *Lean* стартап заснована је на процесу „Направи – Измери - Научи“ (енг. *Build – Measure – Learn*) који је приказан на слици 22, а који се базира на:

- Циклусу „Планирај - Уради - Провери - Делуј“ (енг. *Plan-Do-Check-Act; PDCA*), (Deming, 1986),
- Циклусу „Посматрај - Оријентиши се – Одлучи - Делуј“ (енг. *Observe-Orient-Decide-Act; OODA*), (Boyd, 1986).



Слика 22 Направи-Измери-Научи, енг. Build-Measure-Learn, прилагођено (Ries, 2011)

У првој фази компанија мора да направи производ који се назива минимално одржив производ (енг. *Minimum Viable Product – MVP).* Минимално одржив производ треба да задовољи неке од захтева купаца и императив је његово перманентно представљање (Cook, Bikkani, & Carter, 2023). Овако израђен производ садржи само неке од неопходних функционалности које омогућавају тестирање једне или више хипотеза. На овај начин могуће је реализовати највећу количину потврђеног учења о купцима при чему се улаже минималан труд (Ries, 2011). Како је минимално одржив производ једноставнија варијанта крајњег производа, компанији је потребно значајно мање улагања, при чему не постоји непотребно расипање времена и ресурса. Када је минимално одржив производ презентован купцима компанија је у могућности да одреди које су то карактеристике које заиста додају вредност из перспективе купца. Фаза „Направи“ омогућава брзо потврђивање претпоставки. Минимално одржив производ не односи се увек искључиво на производ намењен тржишту, већ на иницијалну верзију техничког решења чији је циљ тестирање кључних претпоставки.

Друга фаза односи се на анализу података који су у вези са минимално одрживим производом. Ова фаза подразумева јасно утврђивање индикатора перформанси који ће бити посматрани како би се утврдила успешност креираног производа у задовољавању потреба потрошача (Cook, Bikkani, & Carter, 2023). Индикатори перформанси могу бити било које метрике које су дефинисане на начин да одражавају релевантност производа за купца и степен задовољености његових потреба. Прикупљање података може бити статистичким методама и тестовима, али и било којим другим приступом који омогућава увид у снаге и слабости производа. На основу добијених информација приступа се прилагођавању производа и даљем унапређењу и развоју производа који ће бити пласиран купцима.

Три корака која су обухваћена процесом „Направи-Измери-Научи“ не представљају линеарни, већ итеративни циклус који се понавља док се не достигне решење које задовољава унапред дефинисане циљеве.

Последња фаза представља фазу у којој компанија доноси одлуку о наставку развоја производа или потпуном заокрету (енг. *Pivot).* Ова фаза императив ставља на континуирано учење и базира се на подацима прикупљеним током претходне фазе. Уколико компанија стреми даљем унапређењу производа са фокусом на специфичне изазове онда се дефинишу хипотезе које ће омогућити реализацију бољих резултата. Уколико се првобитна идеја драстично мења, онда је реч о пивоту (Cook, Bikkani, & Carter, 2023).

Концепт даљег развоја или пивота може бити и проширен тако да се дефинишу следеће фазе (Blank & Dorf, 2012):

- Пивот (радикална промена),
- Понављање (форсирање једне или више промена али не и радикално мењање концепта производа),
- Ескалација (улагање у постојећи пословни модел),
- Одустајање (пословна визија није одржива).

Lean стартап представља оквир који омогућава развој решења у условима неизвесности и као концепт могуће га је применити и изван стартап компанија, укључујући развој технолошких и инжењерских решења.

Прегледани концепти свакако указују на то да сваки од њих појединачно може имати значајну улогу када је реч о појединачним аспектима имплементације роботских решења у *Lean* индустријским системима. Међутим, приступи се углавном развијају као одвојени концепти, при чему не постоји оквир који повезује избор процеса погодног за роботизацију, одговарајућег роботског решења, процену изводљивости, евалуацију резултата и пилот тестирање. Посебно је значајан недостатак оваквог оквира приликом доношења одлука при ограниченим ресурсима и неизвесности карактеристичним за имплементацију нових технологија. Ово представља полазну основу за развој модела *Agile Robotics Implementation Model (ARIM).*

2.6 Вишекритеријумско одлучивање у контексту имплементације роботских решења у *Lean* индустријским системима

Вишекритеријумско одлучивање *(eng. Multi-Criteria Decision Making – MCDM)* представља методу за помоћ приликом доношења одлука, а може се применити и приликом доношења одлука о имплементацији напредних роботских решења у *Lean* индустријским системима. Вишекритеријумско одлучивање омогућава анализу и рангирање различитих алтернатива кроз формализован модел. Анализирање и рангирање алтернатива на овај начин омогућава доношење одлука на систематичан и транспарентан начин (Hwang & Yoon, 1981). Како се приликом избора роботског решења за имплементацију у индустријским системима процењују различите димензије, најповољније решење не мора показивати истовремено најповољнији резултат у свакој од посматраних димензија.

Једна од најчешће примењиваних *MCDM* метода је аналитички хијерархијски процес (енг. *Analytical Hierarchy Process – AHP).* Ова метода заснива се на декомпозицији проблема одлучивања у хијерархијску структуру циљева, критеријума и алтернатива, а релативна важност критеријума одређује се парним поређењем (Saaty, 1980). У области индустријског инжењерства широко се користи и метода *PROMETHEE* (енг. *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation).* Ова метода омогућава рангирање алтернатива на основу дефинисаних функција преференције за сваки критеријум (Brans & Vincke, 1985). Метода која је коришћена у дисертацији је метода пондерисаног збира *(*енг. *Weighted Sum Model – WSM),* а у табели 5 налази се разлог избора ове методе за конкретан проблем.

Табела 5 Одабир MCDM методе

Метода	Парна поређења	Број алтернатива	Квантитативни КПИ	Транспарентност	Погодност
AHP	Да	Мали	Средња	Средња	○
TOPSIS	Не	Средњи	Висока	Средња	○
PROMETHEE	Не	Средњи	Висока	Средња	○
COPRAS	Не	Средњи	Висока	Средња	○
VIKOR	Не	Средњи	Висока	Средња	○
WSM	Не	Мали	Веома висока	Висока	✓

Када је потребно балансирање између различитих циљева (нпр. минимизирање трошка и максимизација флексибилности) вишекритеријумско одлучивање може бити изузетно значајно. Метода пондерисаног збира је уједно и једна од најједноставнијих метода. Метода пондерисаног збира често се користи када је потребно рангирати алтернативе у односу на више критеријума, а формула која се примењује је:

$$R_j = \sum_{i=1}^{n} w_i q_{ij}$$

Где важи:

R_j– оцена алтернативе j
q_{ij}– оцена алтернативе j према критеријуму i
w_i – пондер критеријума i

На овај начин различите алтернативе се представљају нормализованим оценама према различитим критеријумима. Метода пондерисаног збира погодан је за избор роботског решења јер сам одабир роботског решења најчешће не зависи од само једног критеријума. У самој докторској дисертацији вишекритеријумско одлучивање не посматра се као посебна фаза роботизације. Насупрот томе, вишекритеријумско одлучивање примењује се у више сегмената модела који је развијан у оквиру докторске дисертације и представља методолошку подршку процесу избора и евалуације роботских решења. Метода пондерисаног збира од посебног је значаја у оним сегментима модела у којима постоји више потенцијалних решења са различитих економским, оперативним, перформансама квалитета или безбедности. Ова метода је коришћена пре свега у циљу смањења могућности доношења одлуке на основу једног појединачног показатеља.

Најзначајнија ограничења ове методе односе се на њену способност идентификовања Парето-оптималног решења јер промена тежинских коефицијената не доводи нужно до равномерног померања решења дуж Парето фронта, као и на немогућност идентификовања недоминираних решења која се налазе на неконвексним деловима Парето фронта (Das & Dennis, 1997; Messac & Mattson, 2002). Ово ограничење значајно је приликом анализе проблема са великим бројем алтернатива као и приликом анализа проблема са сложеним односима између критеријума. Ипак, у самом моделу који је развијен у оквиру докторске дисертавије нема пресудан утицај јер циљ није генерисање целокупног Парето фронта, већ подршка у избору и поређењу ограниченог броја практично изводљивих роботских алтернатива на основу унапред дефинисаних критеријума. Метода пондерисаног збира објашњава како се доноси један део одлука у докторској дисертацији, док наредно поглавље представља истраживање засновано на дизајну (енг. *Design Science Research – DSR),* које објашњава како је модел развијен, изграђен и евалуиран као истраживачки артефакт.

2.7 Истраживање засновано на дизајну

Парадигма истраживања заснованог на дизајну *(eng. Design Science Research – DSR)* у својој основи представља парадигму решавања проблема и настоји унапређењу људског знања (vom Brocke, Hevner, & Maedche, 2020). *DSR* је парадигма усмерена на развој артефаката намењених решавању проблема из реалног света на иновативан начин (Hevner et al., 2004). *DSR* је усмерен на стварање новог или унапређење постојећег решења кроз креирање иновативних артефаката (Gregor & Hevner, 2013). Није довољно само развити артефакт, већ је неопходно показати како је конципиран, због чега је развијен, на којим теоријским основама почива као и како је евалуиран. Полазна тачка *DSR*-а јесте идентификовање проблема у организационом окружењу. На основу анализе дефинише се истраживачки проблем. Дефинисани истраживачки проблем решава се на начин који је релевантан у пракси али и за научну заједницу. Како би се развило ново решење потребно је ослањање на постојеће теорије, методе и моделе. Резултат јесте креирање решења које проширује постојеће знање и доприноси развоју области.

У контексту ове дисертације, идентификован проблем односи се на сложеност доношења одлуке о имплементацији роботских решења у *Lean* индустријским системима. Поред високих инвестиционих улагања, имплементација роботског решења може утицати на продуктивност, квалитет, флексибилност, енергетску потрошњу и друге аспекте производног система. Дакле, одлука зависи од више различитих критеријума, и сложеност доношења одлуке представља основ за примену *DSR* приступа. Додатно, очекиване и стварне перформансе пре и након имплементације могу се разликовати.

Централни артефакт представља управо развијени *ARIM* модел за подршку одлучивању о имплементацији роботских решења у *Lean* индустријским системима. *DSR* приступ подразумева итеративност и евалуацију артефакта, као и демонстрацију која је у дисертацији реализована кроз студију случаја у производном окружењу. Процес *DSR*-а одвија се кроз два итеративна циклуса:

- Изградња и
- Евалуација.

Током изградње предлаже се решење, док се у фази евалуације решење испитује. Решење се унапређује све док се артефакт не доведе на задовољавајући ниво. Истраживачке методе које се примењују могу бити анализа литературе, анкета, фокус групе, студије случаја, и друге, а њихова комбинација омогућава развијање примењивог решења и генерисање новог знања. Појединачне методе коришћене у дисертацији (анализа литературе, експертски интервјуи, анализа осетљивости,...) не представљају независне методолошке приступе, већ методе интегрисане у различите фазе *DSR* процеса. На овај начин успоставља се веза између методолошког оквира истраживања (*DSR*), развијеног артефакта (*ARIM*), метода његове операционализације и емпиријске евалуације**.** *DSR* обухвата шест фаза:

- Идентификовање проблема и образложење његовог значаја,
- Дефинисање циљева будућег решења,
- Дизајн и развој артефакта (модел, метода, софтвер...)
- Демонстрација развијеног артефакта (студија случаја, експеримент, симулација,...)
- Евалуација артефакта (квалитативне и квантитативне методе)
- Комуникација резултата истраживања.

Посебно значајно за *DSR* јесте да резултат није искључиво решење за конкретан случај, већ треба бити релевантно и ван посматраног контекста. Иако су развијени различити модели којима се могу постићи слични резултати, *DSR* омогућава систематичан развој и евалуацију модела за подршку одлучивању о имплементацији роботских решења у *Lean* индустријским системима. Начин на који су фазе примењене у самој дисертацији приказан је у табели 6.

Табела 6 Фазе DSR парадигме у развоју модела

Фаза *DSR*	Опис	Примена у дисертацији
Идентификација проблема	Анализа проблема	Анализа изазова имплементације роботских решења у *Lean* индустријским системима
Дефинисање циљева	Одређивање захтева	Дефинисање захтева развијеног модела
Дизајн и развој	Развој артефакта	Развој модела одлучивања и његових механизама
Демонстрација	Примена артефакта	Примена на студији случаја
Евалуација	Процена успешности	Валидација модела и пилот тестирање
Комуникација	Представљање резултата	Научни допринос и препоруке

2.8 Истраживачки јаз

Lean методологија и њени алати за елементарне циљеве имају унапређење квалитета и продуктивности (Dora et al., 2013; Li, Tan, & Hida, 2011; Singh, Bhardwaj, & Sachdeva, 2009) поред елиминисања губитака, вишка инвентара и унапређење тока производње (Boughton & Arokiam, 2000; Chandandeep, 2008). Са друге стране, производња као и производни процеси у значајној мери су трансформисани имплементацијом напредних роботских решења и индустријском аутоматизацијом (El Zaatari et al., 2019), као и других технологија Индустрије 4.0 (Cimini et al., 2020). Аутоматизација може допринети унапређењу конкурентске предности омогућавајући бржу производњу и већу флексибилност (Karakus, Ozturk, & Guldogan, 2021). За обављање специјализованих задатака у производним процесима често се користе роботска решења (Nayyar & Kumar, 2020). Роботи могу обављати и сложене и опасне послове. Интелигентна роботска решења могу обављати задатке са фокусом на безбедност, прилагодљивост и колаборацију (Nayyar & Kumar, 2020). Међутим, сама имплементација роботских решења за неке индустријске системе може бити компликована (Sommer, 2015) пре свега због велике иницијалне инвестиције или недостатка знања (Zhou, 2012). Поред тога, јављају се и изазови као што су ограничени ресурси, финансијска неизвесност и потреба за прилагођавањем производних процеса новим технолошким могућностима. У *Lean* индустријским системима имплементација роботских решења мора да се базира на стратешком размишљању и доношењу одлука на основу података. Све активности неопходно је уравнотежити са сигурношћу исплативости и дугорочним растом.

Ово представља полазну основу за развој *Agile Robotic Implementation Model (ARIM),* чији је основни циљ обезбеђивање систематичног оквира за идентификацију, развој, процену и имплементацију напредних роботских решења у *Lean* индустријским системима. Одлука о имплементацији роботског решења није једнократна, већ је резултат анализе, експериментисања, мерења, учења и прилагођавања.

У прегледаној литератури идентификован је велики број радова који се баве *Lean* производњом, Индустријом 4.0 и роботиком, али истраживање показује да постоји више ограничења када је реч о доношењу одлуке о имплементацији роботских решења у *Lean* индустријским системима. Постојећа истраживања обухватају технички избор и конфигурацију роботских система, примену принципа *Lean* производње, процену економске оправданости, и друге аспекте који су међутим у значајној мери проучавани изоловано. Пре свега, најчешћи избор процеса погодног за роботизацију остаје изван самог процеса одлучивања, а организациони и *Lean* аспекти посматрају одвојено од самог роботског решења. Међутим, у *Lean* индустријским системима потенцијал роботизације зависи од карактеристика процеса и због тога је од изузетног значаја који процес треба роботизовати. Да би адекватно роботско решење било изабрано оно мора бити у складу са посматраним процесом. У литератури постоје приступи који користе различите методе за доношење одлука о роботском решењу које треба имплементирати, али се најчешће посматра ограничен број аспеката (продуктивност, цена и техничке карактеристике). У реалним индустријским условима, одлука је далеко сложенија, и постоји потреба за интегрисаним приступом који различите димензије перформанси посматра као јединствен скуп у процесу доношења одлука. У том смислу недостаје модел који интегрише техничке, организационе, економске, безбедносне и критеријуме квалитета приликом избора роботског решења

Економска и оперативна оправданост имплементације роботског решења најчешће се процењују на основу расположивих података и претпоставки пре саме имплементације и није развијен систем повратне спреге која утиче на преиспитивање иницијалне одлуке. Овај аспект је изузетно значајан у условима неизвесности који карактеришу инвестиције у напредна роботска решења. Уколико се резултати модела не проверавају у реалним условима, остаје неизвесно у којој мери предвиђене перформансе одражавају стварно понашање система. Због тога постоји потреба за механизмом који повезује аналитичку процену са пилот имплементацијом, симулацијом, дигиталним близанцем или другим обликом емпиријске валидације. Сам процес имплементације посматра се као линеаран, а не као процес током кога се на основу добијених резултата донесте одлуке могу поново испитати.

Истраживачки јаз није у недостатку појединачних метода за избор, евалуацију или имплементацију роботских решења у *Lean* индустријским системима, већ у недостатку њихове интеграције у итеративан и подацима подржан процес доношења одлука. Недостаје кохерентан приступ који повезује избор процеса, избор роботског решења, квантитативну процену перформанси, управљање ризиком, практичну валидацију и итеративно доношење одлука (Nikolic et al., 2026).

Идентификовани истраживачки јаз представља основу за формулисање истраживачког проблема и развој новог модела у наставку дисертације. Модел интегрише теоријске концепте *Lean* производње, *Lean* роботике и *Lean* стартапа. *Lean* производња се фокусира на стабилност процеса, док *Lean* роботика доприноси флексибилности и аутоматизацији усмереној на човека. Поред тога, технологије Индустрије 4.0 омогућавају дигитално праћење и симулацију, а *Lean* стартап у фокус ставља итеративно учење у условима неизвесности. Мада су се ови трендови развијали паралелно, они нису интегрисани у истраживањима која се односе на имплементацију роботских решења у индустријским системима (Nikolic et al., 2026).

У наредном поглављу биће представљен начин на који су релевантни теоријски концепти и идентификовани захтеви интегрисани у *Agile Robotics Implementation Model (ARIM),* као и структура и логика предложеног модела.

3. Развој агилног модела имплементације роботских решења у *Lean* индустријским системима *(Agile Robotic Implementation Model – ARIM)*

3.1 Основни теоријски концепти интегрисани у *ARIM*

Развој *ARIM*-а базира се на потреби за методолошки утемељеним оквиром за подршку одлучивању и имплементацији напредних роботских решења у *Lean* индустријским системима. *ARIM* комбинује филозофију *Lean* стартап методологије са *Lean* роботиком и њеним основним постулатима. Фокус модела је на итеративном тестирању имплементације потенцијалних роботских решења без реалне потребе за трошењем ресурса било материјалних или нематеријалних. У том контексту, *Lean* роботика и *Lean* стартап представљају методологије које пружају стратешки оквир индустријским системима у циљу оптималне интеграције напредних роботских решења и ефикасног коришћења свих потенцијала Индустрије 4.0.

Lean роботика подразумева интеграцију *Lean* принципа и роботских решења како би се унапредила ефикасност и квалитет производних процеса. Циљ овог концепта је идентификовање и елиминисање губитака уз повећање продуктивности и побољшање ергономије. Поред тога, стална побољшања и брзо експериментисање су у фокусу модела. Интеграција са *Lean* стартап методологијом омогућава итеративни, подацима вођен приступ који минимизира ризик од неуспеха. *Lean* стартап кроз циклус „Направи–Измери–Научи“ омогућава тестирање технолошких решења без потребе за високим иницијалним инвестицијама, као и доношење одлука које су засноване на подацима.

У табели 7 приказано је како су ови теоријски оквири интегрисани у *ARIM*-у и којим фазама (Nikolic et al., 2026).

Поред успешног увођења технолошких решења уз минимални ризик, синергија ових концепата омогућава и унапређење квалитета, повећање флексибилности, оптимизацију употребе ресурса, флексибилну адаптацију у складу са динамичким променама на тржишту као и управљање ризиком и инвестицијама.

3.2 Концептуални оквир модела

ARIM је методолошки оквир који се базира на подацима и роботско решење не посматра као изоловани елемент већ као део производног система. Приликом имплементације роботског решења посматрају се процес, оператери који сарађују са роботом, али и ток материјала, информација, захтевани квалитет и друге специфичности самог система. Роботско решење се имплементира на оним радним станицама на којима постоји реална потреба. *ARIM* се састоји од три међусобно повезане фазе:

- Иницијална процена,
- *Robotic Startup Cycle–RSC* и
- Пилот тестирање.

Прва фаза, иницијална процена, за циљ има анализирање тренутног стања система, и идентификовање оних радних станица на које је могуће и евентуално потребно имплементирати роботско решење. У овој фази процењује се приоритет потенцијалних радних станица за имплементацију роботског решења.

Табела 7 Теоријске основе интегрисане у ARIM моделу

Теоријски концепт	Кључни концепти и алати	Фаза *ARIM* модела	Допринос *ARIM* моделу
***Lean* производња**	Елиминација губитака, мапирање тока вредности (*VSM*), стабилност процеса, континуирано унапређење	**Иницијална процена**	Обезбеђује структурирано разумевање постојећег стања процеса, омогућава идентификацију уских грла, губитака и варијабилности процеса и успоставља поуздану почетну основу за дефинисање КПИ показатеља пре роботизације.
***Lean* роботика**	Стандардизација процеса, аутоматизација усмерена на човека, пројектовање радне станице засновано на VSM-у, интеграција колаборативних робота	***Robotic Startup Cycle*; Пилот тестирање**	Обезбеђује оперативне и пројектантске принципе за интеграцију роботске радне станице у складу са *Lean* логиком, уз очување стабилности процеса, ергономских захтева и побољшање перформанси на нивоу система.
***Lean* стартап**	Циклус Направи-Измери-Научи, *MVP* на нивоу система, пивот, итеративно експериментисање	**Концептуална структура *ARIM-a; Robotic Startup Cycle***	Обезбеђује итеративну логику *ARIM*-а, омогућавајући брзо тестирање претпоставки, КПИ-засновану валидацију, смањење ризика и адаптивно доношење одлука у условима неизвесности.
Индустрија 4.0 / дигитализација	Симулација, виртуелно моделирање, КПИ контролне табле, праћење и аналитика засновани на подацима	***Robotic Startup Cycle*; Пилот тестирање**	Омогућава виртуелно експериментисање, анализу сценарија и квантитативну процену перформанси пре физичке имплементације, као и континуирано праћење система након имплементације.
Индустрија 5.0 / аутоматизација са фокусом на човека	Дизајн усмерен на човека, ергономија, безбедност оператера, прерасподела радног оптерећења, одрживост, сарадња човека и робота	**Иницијална процена; *Robotic Startup Cycle*; Пилот тестирање**	Обезбеђује да човек представља централни аспект имплементације роботског решења. Избор процеса, пројектовање радне станице и њена адаптација усмерени су на смањење ергономских ризика, унапређење безбедности и успостављање одговарајуће интеракције човека и робота.

На основу резултата иницијалне процене приоритетни процес улази у *RSC* фазу. *RSC* представља оперативно језгро модела. Циљ ове фазе је развој довољно функционалног решења кроз итеративне кораке: Флексибилни трансформативни систем (ФТС), евалуација и итерација. ФТС обезбеђује флексибилно окружење за испитивање различитих конфигурација роботских решења. Евалуација подразумева квантитативну процену перформанси различитих конфигурација роботских решења и итерација омогућава измену и поновно тестирање решења, док решење не задовољи постављене почетне циљеве. Ови кораци формирају затворену петљу која се понавља све док се решење не приближи постављеним циљевима.

Након што роботско решење покаже задовољавајући ниво прелази се у фазу пилот тестирања. Ова фаза подразумева процену решења у условима блиским реалној имплементацији. За разлику од претходних корака, пилот тестирање усмерено је на процену могућности интеграције у реални производни систем и његове укупне одрживости. Уколико решење испуњава дефинисане критеријуме приступа се његовој имплементацији. Уколико решење није адекватно примењује се пивот. Пивот може укључивати измену конфигурације робота, промену процеса, или редефинисање самог проблема који се решава.

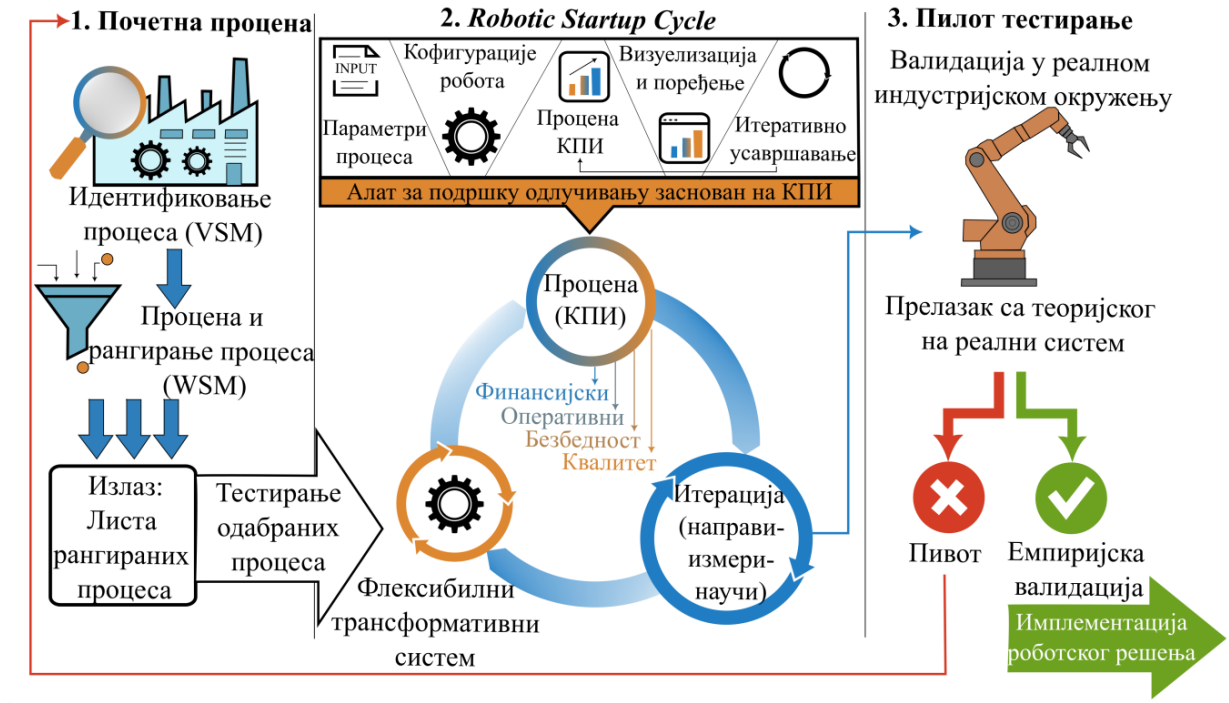
Уколико решење до кога се дође након треће фазе не испуњава постављене услове поново се креће од прве фазе. Модел има следеће карактеристике:

- Модуларан је – има могућност примене појединачних елемената модела,
- Скалабилан је – могуће је применити га на радну станицу, производну линију или цео производни систем и
- Прилагодљив је – могуће га је прилагодити специфичном процесу, производу, или организацији.

Сваки део модела може функционисати независно или у комбинацији са другим деловима, прилагођавајући се специфичним потребама сваког појединачног индустријског система.

Поред тога, модел је могуће кориговати га у складу са специфичним процесом, типом робота који се имплементира или постојећом инфраструктуром Индустрије 4.0. Дизајниран је на начин да се може прилагодити индустријским системима без обзира на њихову организациону структуру, број запослених и саму величину организационог система. Обезбеђује систематичан приступ који омогућава доношење брзих, али и одлука заснованих на подацима.

Дакле, суштина *ARIM*-а је у дефинисању структурираног процеса којим се долази до најпогоднијег решења кроз постепено смањивање неизвесности и експериментисање. На слици 23 приказана је концептуална структура *ARIM*-а.



Слика 23 Концептуална структура и ток ARIM модела

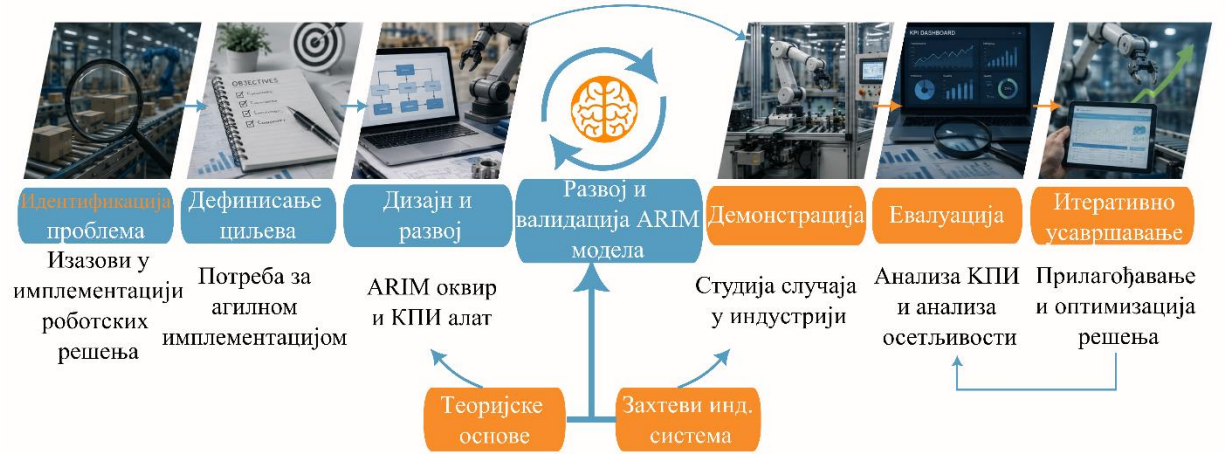
3.3 Методологија развоја и операционализације *ARIM* модела

Развој модела усмерен је на креирање артефакта који омогућава решавање конкретног проблема у индустријској пракси. У складу са тим, само истраживање подразумевало је примену парадигме истраживања науке о дизајну (енг. *Design Science Research – DSR). DSR* комбинује научну строгост са практичном релевантношћу кроз развој и процену сврсисходних артефаката (Hevner et al., 2004; Gregor & Hevner, 2013). Избор ове парадигме одговара природи истраживачког проблема јер примарни резултат дисертације јесте дизајнирани методолошки артефакт, а не само теоријско објашњење феномена. Проблем представља сложеност доношења одлуке о избору и имплементацији напредног роботског решења у *Lean* индустријским системима. Артефакт који је развијен као одговор на овај проблем јесте *ARIM* модел. *ARIM* је централни артефакт. Како би се његова применљивост демонстрирала развијен је алат за подршку одлучивању заснован на КПИ-јевима. Применљивост артефакта је процењена кроз индустријску студију случаја.

На тај начин се у истраживању разликују три нивоа артефакта:

- Концептуални артефакт – *ARIM* као методолошки модел;
- Операционални артефакт – софтверски алат који имплементира поједине елементе модела и омогућава квантитативну подршку одлучивању;
- Емпиријска демонстрација артефакта – примена модела и алата у индустријском окружењу кроз студију случаја.

Оваква структура омогућава да се модел не задржи на концептуалном нивоу, већ да се провери његова применљивост у реалном контексту. Развојни процес је организован у складу са логиком *DSR*-а (Peffers et al., 2007). *DSR* процес примењен у развоју и процену *ARIM*-а приказан је на слици 24.



Слика 24 DSR приступ примењен на развој и валидацију ARIM-а

Проблем је идентификован на основу прегледане литературе и утврђивања ограничења постојећих приступа. Неки од основних проблема којима решење треба да допринесе јесу смањење неизвесности, могућност итеративног тестирања и прилагођавање различитим индустријским контекстима. Циљеви артефакта су:

- Идентификовање и давање приоритета процесима за имплементацију роботског решења,
- Одабир и додатни развој самог роботског решења,
- Тестирање решења пре имплементације у пуном обиму,
- Мерење ефеката кроз КПИ показатеље,
- Вишефакторска процена (техничка, економска, безбедносна...),
- Процена ризика и неизвесности,
- Доношење одлуке о имплементацији или промена приступа.

У трећем кораку дефинисани су основни елементи модела као и њихови међусобни односи. Теоријски концепти Поглавља 2 овде су преведени у конструкционе принципе модела.

У четвртој фази, дефинисани су улазни подаци, критеријуми, показатељи, аналитичке методе, услови преласка из једног у наредни корак као и излазни резултати. Концепт је претворен у поступак који може да се примени у конкретном индустријском систему. Развој подршке одлучивању подразумевао је развој софтверског алата којим су поједини елементи *ARIM*-а операционализовани. Софтвер је омогућио израчунавање дефинисаних КПИ-јева и поређење потенцијалних сценарија различитих роботских решења.

Последњи корак представљао је демонстрацију и евалуацију развијеног артефакта. Модел и софтверски алат примењени су у индустријском контексту. Добијени резултати су анализирани, идентификована су ограничења и процењена је даља применљивост предложеног приступа.

3.3.1 Операционализација модела кроз софтверски алат

Основни методолошки артефакт јесте концептуални модел који је развијен, али да би он био практично примењен неопходна је операционализација појединачних елемената. У ту сврху развијен је софтверски алат за подршку одлучивању. Софтверски алат као основни задатак има квантификацију ефеката различитих роботских решења. Софтвер представља везу између концептуалне структуре модела и конкретног процеса

доношења одлуке. У софтвер се уносе подаци који се односе на производни процес, радну станицу која се разматра за аутоматизацију, трошкове, параметре роботског решења и други. Софтвер на основу ових података израчунава релативне показатеље перформанси. Софтвер разматра четири категорије КПИ-јева, и то: финансијске, оперативне, перформансе квалитета и безбедносне аспекте. Додатно, прате се и показатељи флексибилности. Софтверски алат омогућава измену улазних параметара и поновно рачунање резултата веома једноставно. Ово је од изузетног значаја јер омогућава симулацију различитих сценарија и процену последица промене кључних параметара без измена у самом производном систему. Софтвер не представља независни систем за доношење одлука.

Детаљна архитектура софтверског алата, структура података, начин израчунавања КПИ показатеља и кориснички интерфејс приказани су у Поглављу 4.

3.3.2 Евалуација и итеративно усавршавање модела

У складу са *DSR* приступом, артефакт је процењен у контексту за који је намењен. Резултати евалуације омогућавају његово даље усавршавање. Евалуација је спроведена такође на три нивоа:

- Концептуална евалуација,
- Операционална евалуација,
- Емпиријска евалуација.

Концептуална евалуација проверава логичку повезаност елемената модела и усклађеност ових елемената са истраживачким циљем. Операционална евалуација испитује могућност примене модела кроз развијени алат за подршку одлучивању. Емпиријска евалуација испитује применљивост модела у реалном контексту. Емпиријска евалуација спроведена је кроз индустријску студију случаја. Перформансе су процењене кроз дефинисане КПИ пре и након имплементације роботског решења. Такође, евалуација је обухватила поређење и мануелног и аутоматизованог сценарија. Спроведена је анализа осетљивости чиме се добио увид у стабилност решења у условима промене кључних улазних параметара. Резултати евалуације коришћени су за итеративно усавршавање *ARIM*-а, што одговара основној логици *DSR*-а.

У наставку детаљно су објашњене фазе *ARIM* модела, њихови улазни и излазни елементи, методе које се у њима примењују и критеријуми за прелазак из једне фазе у другу**.**

3.4 Логичка структура и ток *ARIM* модела

Роботско решење које ће бити имплементирано у један индустријски систем не може да се бира искључиво на основу техничких карактеристика. Решење мора бити технички изводљиво али и економски оправдано и у интересу унапређења целог производног система, а не само замене једне мануелне радне станице аутоматизованим решењем. Сама одлука о имплементацији роботског решења у један систем доноси се у условима неизвесности, а поуздани ефекти имплементације роботског решења могу се проценити тек након физичке имплементације. Неизвесност је највише у вези са реалном продуктивношћу, интеракцијом човека и робота, појавом уских грла или новим оперативним трошковима. Доношење одлуке на основу *ex ante* процене може довести до изузетног ризика.

С обзиром на наведено, *ARIM* представља итеративни оквир за доношење одлука на основу анализе постојећег система, генерисања и евалуације различитих сценарија имплементације роботских решења и емпиријске провере изабраног решења. Модел подразумева доношење одлуке о имплементацији напредних роботских решења у *Lean* индустријским системима кроз три корака:

- Иницијална процена *(*енг. *Initial assessment*)*,*
- *Robotic startup cycle - RSC,*
- Пилот тестирање *(*енг. *Pilot testing*).

3.4.1 Почетна процена

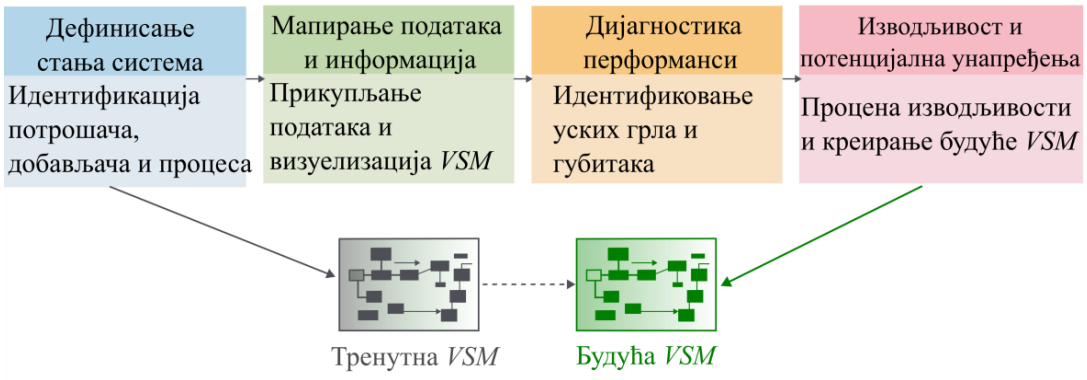
Почетна процена (eng. *Initial Assessment*) представља први корак модела и подразумева процену реалног стања *Lean* индустријског система у коме се планира имплементација напредног роботског решења. Почетна процена подразумева идентификовање оних радних станица које су погодне за имплементацију роботских решења. У складу са принципима *Lean* стартапа методологије ова фаза одговара кораку „*Understand“*, односно разумевање контекста и формулисање проблема који треба решити. Са друге стране, са аспекта *Lean* роботике представља фазу мапирања тренутног процеса и идентификацију губитака *(*енг. *waste).*

Почетна процена омогућава разумевање технолошке зрелости као и реалних пословних потреба за имплементацију напредног роботског решења. Све радне станице које представљају потенцијално место имплементације роботског решења се идентификују без обзира да ли подразумевају обављање репетитивних, физички захтевних, задатака подложних грешкама или оних чија временска реализација није усклађена са остатком производног процеса. За идентификацију ових радних станица, као и процену тренутног стања индустријског система, *ARIM* користи мапирања тока вредности. Мапа тока вредности омогућава сагледавање целокупног стања у једном индустријском систему, а не само неких његових сегмената. Када постоји иницијална идеја о месту имплементације роботског решења, мапа тока вредности може да да увид у нова потенцијална места имплементације. Почетна процена укључује логику оријентисану на човека експлицитним разматрањем учешћа оператера, безбедносних захтева, потреба за обуком и прерасподеле радног оптерећења.

Потенцијалне радне станице за имплементацију роботског решења приоритизују се коришћењем методе пондерисаног збира (*eng. Weighted Sum Method - WSM*), узимајући у обзир више техничких, оперативних и ергономских критеријума, укључујући:

- Време циклуса процеса и варијабилност процеса,
- Интензитет уских грла и ограничења процеса,
- Ручно радно оптерећење и ергономски ризик,
- Квалитет учинка,
- Степен стандардизације процеса и
- Просторна и распоредна ограничења.

Детаљни кораци укључени у фазу почетне процене приказани су на слици 25.



Слика 25 Почетна процена

Ова фаза успоставља структурирану основу за одлучивање за наредне фазе роботске имплементације унутар *ARIM*-а. Улазни параметри у оквиру ове фазе представљени су у табели 8.

Табела 8 Улазни параметри фазе почетна процена

Улазни подаци у оквиру фазе *Иницијална процена*	
Подаци о индустријском систему	Назив, Процес у оквиру ког се врши имплементација роботског решења, Број смена, Трајање смене, Број пауза, Трајање пауза, Број радних дана у месецу
Подаци о купцу	Назив купца, Тип испоруке (директна/инвентар) Залихе за испоруку, Учесталост испоруке (дневно/недељно/...), Количина за испоруку, Величина паковања.
Подаци о добављачу	Назив добављача, Тип набавке (неструктурирана/супермаркет), Залихе у складишту, Учесталост набавке (дневно/недељно/...), Величина која се набавља, Величина паковања.
Процеси	Назив процеса, Тип процеса (стандардан / ток производње / серије / паралелни / заједнички / прерада), Број оператера на процесу, Систем производње (*Push / Supermarket / FIFO*) Залихе испред процеса, Време циклуса (енг. *Cycle time – CT),* Време измене (енг. *Changeover time – CO*), Расположиво време (енг. *On demand machine uptime*), Величина серије производње, Број дефеката, Учесталост извештавања о дефектима,
Информације	Информације које се размењују Ток информација (традиционални / електронски / канбан / нивелисање производње)

Излазни резултати иницијалне фазе на основу прикупљених података и анализа обухватају:

- Матрицу приоритета и
- Препоруке за даљи развој.

Матрица приоритета представља матрицу у којој се процеси рангирају према потенцијалу за имплементацију роботског решења. Приказ опште форме матрице приоритета дат је у табели 9.

Табела 9 Форма матрице приоритета

Матрица приоритета						
Критеријум	**Опис**	**Тежински фактор**	**Процес 1**	**Процес 2**	**Процес 3**	**Процес 4**
Потенцијал за аутоматизацију	Степен понављања задатака	0,25				
Економска оправданост	Однос трошкова и очекиваног ROI	0,25				
Безбедност / Ергономија	Потенцијал смањења ризика по раднике	0,20				
Техничка изводљивост	Простор, интеграција, софтвер	0,15				
Организациона спремност	Прихватање технологије, обуке	0,15				

Укупни скор *(S)* за сваки процес се рачуна као:

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} w_j x_{ij}$$

Где је:

S_i – укупни скор процеса i
w_j – тежински фактор критеријума j
x_{ij} – нормализована оцена процеса i према критеријуму j
n – укупан број критеријума

Највећи скор означава процес са највишим приоритетом. Средњи скор указује на потенцијалну примену у наредним итерацијама. Ниски скор значи да процес тренутно није погодан (али се може размотрити након оптимизације). Матрица приоритета је алат за објективно рангирање процеса који су идентификовани као кандидати за роботизацију. Циљ је да се на једноставан и транспарентан начин покаже који процес има највиши укупни потенцијал. Извештаји матрица дефинишу које процесе прво тестирати, које показатеље треба пратити и који ниво аутоматизације је реалан у првој итерацији. Резултат фазе није коначна одлука о имплементацији, већ идентификација и приоритизација кандидата који ће бити предмет наредне фазе *ARIM* модела.

3.4.2 *Robotic Startup Cycle (RSC)*

Након спроведене иницијалне фазе, приступа се фази *Robotic Startup Cycle - RSC.* Ова фаза представља оперативно језгро *ARIM* модела. Фаза *RSC* омогућава индустријским системима да потврде претпоставку изводљивости и утврде предности и мане имплементације роботског решења пре имплементације у пуном обиму. Развијање,

тестирање и оптимизација потенцијалних роботских решења која ће бити имплементирана у индустријском систему представљају циљ ове фазе. Ова фаза обухвата низ итеративних корака који омогућавају постепено усвајање технологије, почевши од развијања минимално функционалног решења *(*енг. *Minimum Viable Robotic Cell),* преко евалуације перформанси, до прилагођавања и оптимизације на основу добијених података. На овај начин индустријски системи могу увидети ефекте имплементације роботских решења уз минималан ризик и употребу ресурса. У овој фази омогућено је континуирано унапређење и стварање основа за дугорочно одрживу аутоматизацију у складу са принципима Индустрије 4.0.

Из *Lean* стартап методологије *RSC* преузима основну филозофију „Направи-Измери-Научи“, док *Lean* роботика даје оперативни оквир обезбеђујући стандардизован ток рада, визуелно управљање током интеграције робота, континуирано и рано унапређење кроз *Kaizen* петље и сарадњу човека и робота као извор додатне вредности. Стандардизован ток рада омогућава лакше праћење напретка и елиминисање сегмената који могу довести до губитака. Процес роботизације води се кроз структурално јасно дефинисане кораке. Наглашен је значај визуелне транспарентности што омогућава увид у одступања и подстиче решавање проблема у реалном времену. Принцип *Kaizen* интегрисан је у сваки корак ове фазе. Анализа резултата, идентификовање области за унапређење и самоунапређење врши се након сваке итерације. На крају, један од кључних постулата *Lean* роботике, оптимална расподела задатака између човека и робота, у *ARIM* моделу посматра се као извор додатне вредности јер робот преузима оне задатке који су комплексни за човека у смислу поновљивости и опасности, док човек извршава задатке који су креативнији и подразумевају доношење одлука. Кључни циљеви ове фазе односе се на минимизирање ризика, континуирано прилагођавање система, обезбеђивање повратних информација и техничку и оперативну изводљивост роботског решења у реалним индустријским условима.

Мапа тока вредности је улаз у *RSC*. Процес *RSC* је цикличан. Након сваког циклуса, процес треба понављати све док итерације не дају предлог роботског решења који је у складу са циљевима индустријског система. Фаза *RSC* састоји се од три корака:

- Флексибилни трансформабилни систем (енг. *Flexible Transformable System-FTS)*
- Евалуација (енг. *Evaluation*)
- Итерација (енг. *Iteration*)

Критеријуми за завршетак *RSC* испуњени су уколико:

- Роботско решење испуњава минималне техничке захтеве,
- КПИ достижу или премашују дефинисане циљне вредности,
- Квалитет производа је на истом или бољем нивоу,
- Безбедносни и ергономски захтеви су испуњени,
- Постоји економска оправданост решења и
- Решење је стабилно у реалним условима.

RSC се може посматрати као фаза *ARIM* модела која омогућава да се идеја претвори у оптимизовано решење пре него што се донесе одлука о његовој интеграцији у реално производно окружење.

У наставку су објашњена сва три корака *RSC*-а.

3.4.2.1 *Флексибилни трансформативни систем*

Флексибилни трансформативни систем *(*eng. *Flexible Transformable System – FTS)* представља прву фазу у оквиру *RSC* и има за циљ креирање флексибилног оквира у коме се могу тестирати различита роботска решења без потребе за изменама у производном систему. *FTS* омогућава итеративно тестирање концепта и постепено усвајање технологија у складу са принципима *Lean* стартапа и *Lean* роботике. *FTS* је модуларан, скалабилан, могуће га је користити у различитим сценаријима и може се лако конфигурисати у складу са захтевима сваког појединачног индустријског система.

FTS дели сличност са концептом минимално одрживог производа (енг. *Minimum Viable Product - MVP*). *MVP* представља верзију производа која омогућава да се у кратком временском периоду прикаже потрошачима и на тај начин компанија добија повратне информације како би даље унапредила производ. *MVP* се дефинише као верзија производа која омогућава прикупљање највеће количине потврђеног учења уз најмање уложеног напора. У овој фази развија се решење које садржи кључне елементе како би се тестирале основне функционалности. Циљ није креирање финалног решења, већ довољно доброг прототипа који ће омогућити мерење ефеката и идентификацију потенцијалних унапређења.

У *ARIM*-у се уместо термина *MVP* користи *FTS* јер предмет развоја мора да испуни техничке и оперативне услове индустријског окружења.

Минимално функционално роботско решење садржи елементе који зависе од конкретног процеса, а могу укључивати:

- Роботску јединицу,
- Основне сензоре,
- Систем управљања,
- Одговарајући грипер односно хватаљку,
- Неопходне елементе безбедности,
- Основну комуникацију са постојећом опремом.

Елементи који нису неопходни за проверу почетних претпоставки се изостављају како би се смањили време и трошак развоја почетне конфигурације.

FTS је фаза у којој се постављају основи за процену изводљивости имплементације роботског решења у једном индустријском систему, пре него што се пређе у потпуну интеграцију. На овај начин одражава се *Lean* стартап филозофија „брзог учења кроз експеримент“. Истовремено примењују се принципи елиминисања губитака и стварања вредности. Основна претпоставка је да се оптимална конфигурација роботског решења не мора унапред познавати већ се може постепено идентификовати кроз серију контролисаних експеримената.

FTS креиран је за потребе модела и представља више од производа, омогућава валидирано учење базирано на подацима. Има модуларан дизајн и омогућава тестирање у различитим производним окружењима, при чему је његова интеграција у индустријске системе једноставна са високим степеном разноврсности роботских решења.

За потребе модела, у оквиру *FTS* фазе, развијен је софтвер који омогућава утврђивање КПИ у случају имплементације напредног роботског решења на различитим радним станицама. Софтвер је развијен на начин да се може имплементирати у било ком индустријском систему. Реконфигурација софтвера је лака, а подаци се могу ажурирати у случају промена у производном процесу. Софтвер омогућава процену КПИ који су

кључни у доношењу одлуке о имплементацији роботског решења без потребе за великим почетним инвестицијама. Могу се испитати различите алтернативе са ограниченим ресурсима. Могу се мењати тип и конфигурација робота, позиција робота, број оператера, учешће оператера у процесу и однос човек-робот, и други параметри. Архитектура и функције софтвера развијеног за потребе модела биће представљене у посебном поглављу.

Основни резултати *FTS* су:

- Иницијална роботска конфигурација,
- Дефинисани експериментални сценарио,
- Дефинисани параметри тестирања,
- Дефинисани КПИ за мерење,
- Информације неопходне за наредну фазу – евалуација.

3.4.2.2 Евалуација

Евалуација, односно процена методолошки је подржана *ARIM* моделом, и представља други корак *RSC*-а. За разлику од иницијалне процене у којој се идентификује процес за роботизацију, евалуација подразумева процену конкретног роботског решења развијеног у оквиру *FTS*-а. Након што је развијена минимална функционална конфигурација роботског решења, ова фаза из корака „Направи“ прелази у корак „Измери“ у оквиру „Направи-Измери-Научи“ циклуса. Софтвер за подршку одлучивању омогућава процену потенцијалних користи, ризика, и исплативности инвестирања у роботско решење у зависности од циљева индустријског система у коме се врши интеграција (слика 26).



Слика 26 Софтвер за подршку одлучивању

Ова фаза подразумева детаљну процену КПИ. КПИ који се анализирају одабрани су на основу прегледа литературе и спроведених интервјуа у сарадњи са стручњацима са релевантним искуством. Евалуација обухвата финансијске, оперативне, перформансе квалитета и безбедности као и аспект флексибилности роботског решења. Поред рачунања самих показатеља након имплементације роботског решења, од изузетне важности је поређење стања система пре и након имплементације роботског решења. Поред тога, пореде се перформансе различитих роботских решења, уколико је у претходној фази дефинисано више од једног роботског решења које одговара захтевима конкретног производног система. Процена се обавља не само на нивоу успешности реализације предвиђених задатака, већ и на нивоу унапређења перформанси целокупног

процеса, јер роботизација само по себи није циљ, већ стварање веће вредности и елиминација губитака. Уколико се утврде одступања планираних од реализованих КПИ онда се дефинишу могуће измене роботске конфигурације или начина интеракције човека и робота. Само инвестирање у потенцијално роботско решење не базира се на претпоставкама или проценама добављача технологије, већ се врши итеративно и контролисано тестирање. На тај начин смањује се ризик од избора погрешног роботског решења пре преласка у Пилот тестирање.

У оквиру евалуације спроводи се и анализа осетљивости резултата на промену кључних улазних параметара. Анализом осетљивости утврђује се робусност добијених резултата. Анализа осетљивости омогућава идентификовање оних параметара који имају највећи утицај на перформансе роботског решења. На овај начин утврђују се критични параметри и границе промене истих у оквиру којих роботско решење задржава прихватљиве перформансе. Добијене вредности КПИ указују на следећи корак, итерацију, или даље усавршавање решења уколико нису постигнути жељени резултати.

3.4.2.3 Итерација

Последња фаза *RSC*-а је фаза итерације. Фаза итерације омогућава континуирано побољшање кроз серију контролисаних циклуса. Уз мање измене приступа се поновном тестирању решења и омогућава се инкрементално развијање роботског решења које ће бити имплементирано. Као и претходне, и ова фаза доприноси доношењу одлуке о оптималном роботском решењу без потребе за великим инвестицијама, при чему се сваки корак верификује подацима. Измене могу бити у дизајну радне ћелије, софтверским параметрима, начину колаборације, сензорским решењима,... Унапред утврђени циљеви пореде се са КПИ који су добијени у фази евалуације. У зависности од резултата даље се идентификују потенцијалне области за побољшање. Ова фаза подразумева и упознавање радника са потенцијалним роботским решењем које може бити имплементирано у датом индустријском систему. Радници дају повратне информације на основу којих се идентификују проблеми и анализира утицај имплементације роботског решења на редовне пословне активности. Фокус је на управљању трошковима, мерењу перформанси, дугорочној одрживости, континуираном побољшању и унапређењу роботског решења.

Ова фаза, у складу са агилним приступом и принципима *Lean* роботике фокус ставља на брзу реакцији и адаптацији система. Итерацијом се реализује континуирано тестирање и унапређење роботских решења пре пуне имплементације. Фокус је на постепеној адаптацији ризика, чиме се минимизира ризик и омогућава се идентификација недостатака у односу на планиране резултате. Графички приказ корака у оквиру фазе итерације налази се на слици 27.

Прикупљање повратних информација од запослених и стручњака реализује се структурираним упитницима и интервјуима. Квалитативна и квантитативна анализа података како би се идентификовали узроци одступања извршава се применом *PDCA* циклуса, *Ishikawa* дијаграма и *Likert*-овом анализом ставова. *PDCA* циклус се користи како би се обезбедио систематичан процес побољшања. Као подршка идентификације узрока одступања од очекиваних резултата примењује се *Ishikawa* дијаграм. Овим дијаграмом омогућена је структурирана анализа између извора проблема као што су технолошки фактори, људски фактори или организациони аспект.



Слика 27 Фаза итерације

Повратне информације од оператера који ће сарађивати са роботским системом такође су важан део итерације и у ту сврху користе се структурирани упитници дизајнирани према *Likert* скали који обухвата четири кључне области:

- Ергономија и безбедност – да ли је физичко оптерећење смањено након имплементације робота?
- Колаборација робота и човека - да ли је интеракција са роботом јасна, сигурна и интуитивна?
- Флексибилност процеса – да ли је робот лако прилагодљив различитим задацима или типовима производа?
- Поузданост – да ли ће робот повећати продуктивност и смањити број грешака у раду?

Резултати упитника анализирају се статистичким методама. На крају, разрада конкретних мера обавља се кроз *Kaizen* петљу и *A3* методологију.

Поређење КПИ пре и после итерације омогућава увид у ефекте предложених измена. Разлика се представља као процентуално побољшање као и испитивањем применом *paired t-test* како би се утврдило да ли је унапређење статистички значајно. Када се решење покаже као стабилно прелази се у фазу пилот тестирања. Овакав приступ који комбинује квантитативне и квалитативне податке обезбеђује холистички приступ који омогућава развијање роботског решења у складу са потребама индустријског система.

У контексту *Lean* роботике, итерација елиминише непотребне активности и губитке, док у складу са *Lean* стартап приступом обезбеђује учење кроз експерименте („*fail fast, learn fast*“). Критеријуми за завршетак итеративног циклуса дефинишу се пре почетка тестирања. Решење се сматра спремним за прелазак у фазу пилот тестирања када су испуњени минимални захтеви у погледу перформанси, квалитета, безбедности и економске оправданости. Излазни резултат ове фазе јесте стабилно и евалуирано роботско решење. Уколико ни након више итерација није могуће достићи постављене циљеве, резултат итеративног процеса представља основ за преиспитивање роботског решења или процеса који је иницијално изабран за роботизацију.

3.4.3 Пилот тестирање

Након што је завршен *RSC* и утврђено да тестирано роботско решење испуњава дефинисане минималне захтеве, приступа се фази пилот тестирања. Ова фаза представља прелаз између контролисаног развоја и евалуације роботског решења у оквиру *RSC*-а и његове потенцијалне пуне интеграције у производни систем. Циљ ове фазе јесте емпиријска провера могућности реализације очекиваних перформанси од стране дефинисаног роботског решења у реалним производним условима.

Пилот тестирање подразумева ограничену примену решења у стварном производном окружењу. На тај начин обухватају се варијабилности производног процеса које нису обухваћене у претходним фазама, као што су непланирани застоји, понашање оператера, интеракција са постојећом опремом и други услови. Пилот тестирање у ствари представља контролисани експеримент ограниченог обима. Његов циљ је прикупљање довољне количине емпиријских података како би се и коначно донела одлука о имплементацији посматраног роботског решења.

Основни циљеви пилот тестирања су:

- Провера техничке изводљивости,
- Могућност реализације перформанси,
- Валидација КПИ-јева,
- Поређење предвиђених и реализованих перформанси роботског решења,
- Процена утицаја роботског решења на цео процес и
- Други аспекти.

Пилот тестирање у том смислу не тестира само техничке функционалности предложеног роботског решења већ фокус проширује на цео производни систем. Овим се проверава да позитивни ефекти на једној радној станици неће створити ограничење или промену у другим деловима производног процеса. У зависности од природе процеса, расположивих ресурса и степена технолошке зрелости, пилот тестирање може бити реализовано кроз:

- Физички пилот систем,
- Флексибилну роботску станицу,
- Симулациони модел,
- Дигиталне близанце,
- Комбинацију ових метода.

Избор одговарајућег приступа треба да омогући проверу претходно дефинисаних претпоставки уз контролисан ниво трошкова и ризика. Предност се може дати физичким пилот системима, а уколико су трошкови високи или постоје ограничења система, симулације и дигитални близанци могу омогућити проверу система пре физичке имплементације. Избор форме пилот тестирања треба у обзир да узме следеће факторе:

- Техничку сложеност роботског решења,
- Ризик повезан са имплементацијом,
- Трошкове пилот тестирања,
- Доступност производне опреме и података,
- Потребан ниво реализма тестирања,
- Могућност мерења дефинисаних КПИ показатеља,
- Утицај роботског решења на оператере и производни процес,
- Степен технолошке зрелости решења.

Без обзира на одабран начин реализације пилот тестирања, треба поредити резултате *ex ante* и *ex post* анализе. Пилот тестирање на тај начин омогућава проверу валидности претпоставки на којима је заснована одлука о његовој имплементацији.

Три основна исхода могућа у случају пилот тестирања су:

- Потпуна имплементација, уколико роботско решење остварује дефинисане критеријуме,
- Додатна оптимизација, уколико су идентификована мања одступања која се могу отклонити,
- Пивот, односно потпуни заокрет, уколико се утврде значајна одступања или претпоставке на којима је решење засновано више нису валидне

У случају пивота, *ARIM* модел подразумева повратак на претходне фазе и потпуно нову итерацију. На овај начин пилот тестирање затвара петљу између аналитичког доношења одлука и практичне примене роботског решења.

3.5 *Lean* основе *ARIM* модела

Након што су дефинисане све фазе *ARIM* модела, у табели 10 је дата анализа његове концептуалне повезаности са *Lean* принципима и концептима. Ова анализа има за циљ да прикаже да *ARIM* модел није само оперативни алгоритам за имплементацију роботских решења, већ и оквир који почива на филозофији елиминације губитака, континуираног унапређења и стварања вредности.

Табела 10 Концептуална повезаност ARIM модела и Lean принципа

Lean принцип	Контекст у *ARIM* моделу	Практичан ефекат
Дефинисање вредности	У почетној процени (*Initial Assessment*), вредност се дефинише са становишта корисника - шта роботизација стварно доноси (нпр. смањење грешака, повећање капацитета, побољшање ергономије)	Јасно дефинисани циљеви аутоматизације, боља усаглашеност са стратешким приоритетима организације
Идентификација тока вредности	Кроз анализу процеса у првој фази *ARIM* модела, идентификују се све активности у процесу и одређује које додају вредност и које представљају губитак	Смањење непотребних корака, елиминација активности које не додају вредност
Континуирани ток	У фази *Robotic Startup Cycle* (посебно у *FTS* и Евалуацији), обезбеђује се несметан ток информација и активности кроз све фазе модела	Повећана ефикасност имплементације, брже доношење одлука
***Pull* систем**	*ARIM* модел се заснива на потребама процеса и стварним подацима - решења се „вуку“ из захтева процеса, а не „гурају“ из технологије.	Роботизација се примењује само где постоји јасна потреба, избегава се прекомерна аутоматизација
Тежња ка савршенству	Фаза Итерација омогућава континуирано побољшање кроз анализу КПИ, повратне информације радника и ревизију података	Континуирано повећање перформанси и адаптабилност система

Tabela 10 (наставак) Концептуална повезаност ARIM модела и Lean принципа

Lean принцип	Контекст у *ARIM* моделу	Практичан ефекат
Kaizen	Уграђен је у сваки корак *ARIM* циклуса - свака итерација се користи за побољшање процеса, софтвера и техничких параметара	Постепено унапређење решења без великих трошкова или застоја
Jidoka	У евалуацији и итерацији софтвер континуирано прати КПИ и сигнализира одступања	Рано откривање грешака, спречавање скупих промашаја у каснијим фазама имплементације
Стандардизација процеса	*ARIM* модел стандардизује цео ток роботизације, од анализе до тестирања, кроз шаблоне, критеријуме и КПИ структуре	Повећана транспарентност и упоредивост различитих процеса у систему
Визуелно управљање	Коришћење графичких интерфејса у софтверу и визуелизације одлучивања у *ARIM*-у	Јаснија комуникација између инжењера, оператера и менаџмента
Укључивање људи	Кроз фазу Итерација радници се активно укључују преко повратних информација и анкета о перформансама и колаборацији са роботима	Већа прихваћеност технологије, смањење отпора промени и боља ергономија

3.6 Алат за подршку одлучивању заснован на КПИ

3.6.1 Идентификација КПИ из литературе

Доношење одлуке о избору роботског решења као и о његовој коначној имплементацији у *ARIM* моделу заснива се на скупу кључних КПИ. КПИ омогућавају поређење различитих роботских решења и за разлику од традиционалних приступа анализа се не заснива само на економским, већ интегрише финансијске, оперативне, аспекте безбедности и квалитета.

Финансијски КПИ омогућавају процену одрживости инвестиције и квантификују економске факторе имплементације роботских решења у индустријским системима (Nikolic et al., 2023). Најчешће спомињани КПИ-јеви у литератури су поврат на улагање *(*енг. *Return on Investment – ROI),* трошкови рада, трошкови по јединици или сату, трошкови одржавања и сарадње човека и робота (Stelian & Eyas, 2025; Accorsi, et al., 2019), период повраћаја инвестиције (Accorsi, et al., 2019; Giberti et al., 2022), као и трошкови материјала по производној јединици, који одражавају индиректне економске користи од смањења отпада и оптимизације процеса (Makrini et al., 2017).

Оперативни КПИ одражавају способност роботског система да побољша производне перформансе. Они обухватају показатеље који мере време испоруке, време циклуса *(eng. Cycle Time – C/T),* пролазност из првог покушаја *(eng. First Pass Yield – FPY),* стопа обрта залиха (Ghelani, 2021), укупну ефикасност опреме *(eng. Overall Equipment Effectiveness – OEE)* (Ghelani, 2021; ISO, 2021; Stelian & Eyas, 2025), проток (Keshvarparast et al., 2023), стопу производње и број оператера на задатку (Keshvarparast et al., 2023; Melville, Gurbaxani, & Kraemer, 2007; Accorsi, et al., 2019), као и минимизирање утрошка материјала, времена или другог отпада, и максимизирање продуктивности, мерене као излаз по јединици времена (Stelian & Eyas, 2025). КПИ који се односе на квалитет укључују стопу дефеката (Stelian & Eyas, 2025), број грешака и

стабилност процеса. Стабилност процеса процењује се на основу варијација времена циклуса (C/T) или квалитета производа (Kolberg & Zulke, 2015).

Безбедност и здравље на раду, као и ергономија, најчешће се прате кроз КПИ који укључују број повреда и учесталост незгода (Stelian & Eyas, 2025), број обрађених јединица по оператеру на дневном нивоу (Keshvarparast et al., 2023; Accorsi, et al., 2019), физичко оптерећење и стопу адаптације радника. Стопа адаптације радника одражава флексибилност система као и ефикасност обуке.

Иако литература идентификује велики број КПИ који могу бити релевантни приликом евалуације роботских решења, нису сви погодни за практичну примену у различитим индустријским системима. Из тог разлога је у оквиру развијеног софтверског алата имплементиран скуп КПИ који обезбеђује довољно широку процену ефеката роботизације, а истовремено омогућава једноставно прикупљање улазних података. Листа свих КПИ-јева који су идентификовани као најчешће спомињани у литератури, а у вези са имплементацијом роботских решења у *Lean* индустријским системима приказана је у табели 11.

Табела 11 КПИ из литературе

КПИ из литературе		
Финансијски	Повратак на улагање Трошкови рада Трошкови по јединици производа Трошкови по сату	Трошкови одржавања Трошкови сарадње човека и робота Период повраћаја инвестиције Трошкови материјала по производној јединици
Оперативни	Време испоруке Време циклуса Принос из првог пролаза Стопа обрта залиха Укупна ефикасност опреме Проток	Стопа производње Број оператера на задатку Минимизација утрошеног материјала Минимизација утрошка времена Други облици отпада Продуктивност
Перформансе квалитета	Стопа дефеката Број грешака Стабилност процеса	Варијација времена циклуса Варијација квалитета производа
Безбедност, здравље на раду и ергономија	Број повреда Стопа/учесталост незгода Број обрађених јединица по оператеру дневно	Физичко оптерећење радника Стопа адаптације радника Ефикасност обуке радника

3.6.2 Експертска валидација КПИ идентификованих у литератури

Идентификовани КПИ нису директно имплементирани у *ARIM* модел, већ су најпре подвргнути процесу експертске валидације. Циљ овог корака био је да се провери њихова релевантност у реалним условима индустријске праксе, као и да се идентификују додатни показатељи који у литератури нису довољно заступљени, а имају значај приликом доношења одлуке о имплементацији роботских решења.

Интервјуи су спроведени са стручњацима из области *Lean* индустријских система, имплементације напредних роботских решења, и консултантима специјализованих за

Lean и/или аутоматизацију. Интервјуи су спроведени са шест стручњака и били су полуструктурирани са два основна циља:

- Валидација и
- Проширење.

Валидација је подразумевала потврђивање чињенице да су КПИ идентификовани у литератури заиста релевантни и у пракси, док је проширење подразумевало идентификацију додатних КПИ који се сматрају важним за доношење одлука у пракси а нису поменути у литератури. Креирана је листа параметара и они су систематски рангирани и распоређени по приоритету узимајући у обзир њихову релевантност за доношење одлука.

Током интервјуа стручњацима је представљена иницијална листа КПИ добијена анализом литературе. Од њих је тражено да процене значај сваког показатеља приликом избора роботског решења, предложе евентуалне измене и идентификују показатеље који недостају. Добијени резултати валидације приказани су у табели 12.

Као резултат интервјуа формирана је проширена листа КПИ, који се налазе у табели 13, а која је обухватала како показатеље идентификоване у литератури, тако и додатне КПИ предложене од стране експерата. На овај начин обезбеђено је да систем индикатора не одражава искључиво академски приступ, већ и стварне потребе индустријске праксе.

Када је реч о појединачним параметрима који су искључени из крајње листа КПИ који су интегрисани у софтверско решење за помоћ у одлучивању током имплементације роботског решења у индустријске системе, битно је нагласити да, иако релевантни за за праћење перформанси одржавања, *MTBF* и *MTTR,* нису укључени због потенцијалног недостатка података у различитим сценаријима у случају имплементације модела у различитим индустријским системима. Ниво изложености буци релевантан је само за одређене типове роботских решења, стопа искоришћености робота се у великој мери преклапа са оперативним показатељем OEE, док је стопа задовољства радника изразито субјективан показатељ и тешко га је стандардизовати у моделу. Број робота по радној станици више представља карактеристику решења него сам показатељ перформанси, док је ниво дигиталне повезаности такође је тешко једнозначно дефинисати и мерити. Сходно наведеном, коначна листа КПИ који су интегрисани у софтверско решење дата је у табели 14.

Табела 12 Валидација КПИ идентификованих у литератури од стране експерата

Бр.	КПИ	E1	E2	E3	E4	E5	E6	Одлука
1	Повратна улагање	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Задржан
2	Трошкови рада	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Задржан
3	Трошкови по јединици производа	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Задржан/операционализован
4	Трошкови по сату	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Задржан/операционализован
5	Трошкови одржавања	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Задржан/операционализован
6	Трошкови сарадње човек–робот	✓	✗	✓	✗	✓	✗	Искључен
7	Период повраћаја инвестиције	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Задржан
8	Трошкови материјала по производној јединици	✓	✓	✗	✓	✓	✗	Искључен
9	Време протока	✓	✗	✗	✓	✗	✓	Искључен
10	Време циклуса	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Задржан/операционализован
11	Принос из првог пролаза	✓	✓	✓	✓	✗	✓	Задржан/операционализован
12	Стопа обрта залиха	✗	✗	✗	✓	✗	✗	Искључен
13	Укупна ефикасност опреме	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Задржан
14	Проток	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Задржан/операционализован
15	Стопа производње	✓	✓	✓	✓	✓	✗	Задржан/операционализован
16	Број оператера на задатку	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Задржан/операционализован
17	Потрошња материјала	✓	✓	✗	✓	✓	✗	Искључен
18	Утрошак времена	✓	✗	✓	✓	✗	✓	Задржан/операционализован
19	Други облици отпада	✗	✗	✓	✗	✗	✗	Искључен
20	Продуктивност	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Задржан/операционализован
21	Стопа дефеката	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Задржан
22	Број грешака	✓	✗	✓	✗	✓	✗	Искључен
23	Стабилност процеса	✓	✓	✓	✓	✗	✓	Задржан/операционализован
24	Варијација времена циклуса	✓	✓	✗	✓	✗	✓	Искључен
25	Варијација квалитета производа	✓	✗	✓	✗	✓	✗	Искључен
26	Број повреда	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Задржан/операционализован
27	Стопа незгода	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Задржан/операционализован
28	Број обрађених јединица по оператеру дневно	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Задржан/операционализован
29	Физичко оптерећење радника	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Задржан/операционализован
30	Стопа адаптације радника	✓	✓	✗	✓	✗	✓	Искључен
31	Ефикасност обуке радника	✗	✓	✗	✗	✓	✗	Искључен

Табела 13 Проширена листа КПИ

КПИ предложен током интервјуа	Е1	Е2	Е3	Е4	Е5	Е6	Одлука
Нето добит	✓	✓	✓	✓	✓	✗	Укључен
Тачка рентабилности	✓	✓	✗	✓	✓	✗	Укључен
Стопа одсуствовања због боловања	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Укључен
Стопа флуктуације запослених на конкретном радном месту	✓	✓	✓	✗	✓	✓	Укључен
Годишњи трошак боловања	✓	✓	✓	✓	✓	✗	Укључен
Годишњи трошак флуктуације запослених	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Укључен
Стопа непоштовања безбедносних захтева	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Укључен
Време рада роботског система	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Укључен
Нето садашња вредност (директни ефекти)	✓	✓	✓	✓	✓	✗	Укључен
Нето садашња вредност (проширени ефекти)	✓	✓	✗	✓	✓	✓	Укључен
Трошак инсталације по радном сату робота	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Укључен
Трошак обуке радника по произведеној јединици	✓	✓	✓	✓	✗	✓	Укључен
Трошак електричне енергије по произв. јединици	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Укључен
Трошак одржавања по радном сату робота	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Укључен
Трошак рада по радном сату робота	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Укључен
Нето утицај роботизације на радну снагу	✓	✓	✓	✓	✓	✗	Укључен
Коефицијент потрошње енергије	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Укључен
Индекс инвестиционе ефикасности	✓	✓	✓	✓	✗	✓	Укључен
Годишња количина производа за продају	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Укључен
Избегнути трошак рада услед роботизације	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Укључен
Годишња уштеда услед смањења трошкова флуктуације	✓	✓	✓	✓	✓	✗	Укључен
Уштеда по основу смањења трошкова боловања	✓	✓	✓	✓	✓	✗	Укључен
Ослобођени радни капацитет	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Укључен
Вредност ослобођеног капацитета	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Укључен
Стопа искоришћености робота	✓	✓	✗	✓	✗	✗	Искључен
Стопа расположивости робота	✓	✗	✓	✗	✗	✓	Искључен
Средње време између отказа (*MTBF*)	✓	✗	✓	✗	✓	✗	Искључен
Средње време поправке (*MTTR*)	✓	✓	✗	✗	✗	✓	Искључен
Ниво изложености буци	✓	✗	✗	✓	✗	✗	Искључен
Стопа задовољства радника	✗	✓	✗	✓	✗	✗	Искључен
Стопа ангажованости запослених	✗	✓	✗	✗	✓	✗	Искључен
Број сати обуке по запосленом	✓	✓	✗	✗	✗	✗	Искључен
Површина коју робот заузима	✗	✓	✗	✓	✗	✗	Искључен
Емисије угљеника по произведеној јединици	✗	✓	✓	✗	✗	✗	Искључен
Ниво дигиталне повезаности	✗	✗	✓	✗	✓	✗	Искључен
Сложеност програмирања робота	✓	✗	✗	✗	✓	✗	Искључен
Време промене производног процеса	✓	✓	✗	✓	✗	✗	Искључен
Број робота по радном месту	✗	✓	✗	✗	✗	✓	Искључен

Табела 14 Коначан списак КПИ

Бр.	КПИ	Објашњење / улога у моделу
1	Нето добит	Нето добит остварена након имплементације роботског решења
2	Тачка рентабилности	Ниво обима производње при којем се изједначавају укупни приходи и укупни трошкови
3	Нето садашња вредност (директни ефекти)	Нето садашња вредност инвестиције израчуната на основу директних финансијских ефеката роботизације
4	Нето садашња вредност (проширени ефекти)	Нето садашња вредност инвестиције која, поред директних, укључује и шире економске ефекте роботизације
5	Повратак на улагање	Повратак остварен у односу на уложена средства у роботско решење
6	Период повраћаја инвестиције	Време потребно за повраћај почетног улагања
7	Трошак рада по радном сату	Трошак рада изражен по једном радном сату
8	Трошак инсталације по радном сату робота	Трошак инсталације распоређен на радне сате робота
9	Трошак обуке радника по произведеној јединици	Трошак обуке радника распоређен на произведене јединице
10	Трошак електричне енергије по произведеној јединици	Трошак електричне енергије распоређен на произведене јединице
11	Трошак одржавања по радном сату робота	Трошак одржавања роботског система изражен по радном сату
12	Трошак рада по радном сату робота	Трошак рада повезан са функционисањем роботског система, изражен по радном сату
13	Избегнути трошак рада услед роботизације	Трошак рада који се избегава применом роботског решења
14	Годишњи трошак флуктуације запослених	Укупни годишњи трошак повезан са флуктуацијом запослених
15	Годишња уштеда услед смањења трошкова флуктуације	Годишња уштеда остварена смањењем трошкова флуктуације запослених
16	Годишњи трошак боловања	Укупни годишњи трошак повезан са одсуствовањем због боловања
17	Уштеда по основу смањења трошкова боловања	Уштеда остварена смањењем трошкова боловања након имплементације роботског решења
18	Вредност ослобођеног капацитета	Економска вредност капацитета ослобођеног применом роботизације
19	Укупна ефикасност опреме	Показатељ укупне ефикасности роботског система на основу расположивости, перформанси и квалитета
20	Време рада роботског система	Време током којег робот функционише у производном процесу
21	Годишња количина производа за продају	Укупна годишња количина произведених производа погодних за продају
22	Ослобођени радни капацитет	Радни капацитет ослобођен услед смањења потребе за ручним радом након роботизације
23	Стопа флуктуације запослених на конкретном радном месту	Учесталост флуктуације запослених на посматраном радном месту

Табела 14 (наставак) Коначан списак КПИ

Бр.	КПИ	Објашњење / улога у моделу
24	Нето утицај роботизације на радну снагу	Укупни нето ефекат роботизације на потребу за радном снагом
25	Стопа дефеката	Удео дефектних производа у укупно произведеној количини
26	Стопа одсуствовања због боловања	Удео радног времена изгубљеног услед одсуствовања запослених због боловања
27	Стопа непоштовања безбедносних захтева	Удео случајева у којима нису испуњени дефинисани безбедносни захтеви
28	Коефицијент потрошње енергије	Показатељ потрошње енергије роботског система у односу на обим производње
29	Индекс инвестиционе ефикасности	Индекс који показује ефикасност инвестиције у роботско решење, у складу са дефиницијом коришћеном у моделу

3.7 Концептуалне карактеристике и допринос *ARIM* модела

Развијени модел представља интегрисани приступ за доношење одлуке о имплементацији роботског решења у индустријским системима. Развијени модел не само да омогућава доношење одлуке о самој имплементацији већ омогућава избор између више алтернатива роботских конфигурација и евалуацију различитих роботских решења. Креирани модел не обухвата само један аспект инвестирања у роботско решење, већ се фокусира на смањење ризика и могућност итеративног унапређења решења које ће бити имплементирано у индустријском систему.

Модел интегрише финансијске, оперативне, показатеље квалитета и безбедности у један оквир за доношење одлука. На овај начин модел не посматра само економску исплативност инвестиције већ у обзир узима утицај на продуктивност, квалитет, радну снагу и дугорочну одрживост. Модел не подразумева само два могућа исхода: прихватити или одбацити роботско решење, већ омогућава итеративни развој постојећег решења или покретање пивота ка алтернативном решењу.

Модел се састоји од компоненти које се могу посматрати појединачно или као функционалне целине процеса доношења одлуке о имплементацији роботског решења у индустријском систему. Модел се може примењивати у индустријским системима различите сложености, као и за процену једног или више различитих роботских решења.

Поред наведеног, *ARIM* модел омогућава извршавање евалуације при промени улазних параметара. Тако се омогућава процена користи и при различитим параметрима или у различитим животним циклусима роботског решења.

Уколико резултати покажу да решење не испуњава захтеване услове, процес не подразумева аутоматско одбацивање роботског решења, него подразумева идентификовање кључних параметара и разлога незадовољавајућих резултата. Након тога, приступа се модификовању решења или избору другачије технологије.

Посебно значајно у оквиру развијеног модела јесте фокус на радну снагу и процена утицаја имплементације роботског решења на оператере. Модел посматра параметре као што су трошкови рада, стопа одсуства због боловања, стопа флуктуације запослених на конкретном радном месту као и ослобођени радни капацитет. На овај начин, имплементација роботског решења не посматра се као замена за људски рад већ као начин промене организације рада и расподеле производних активности. Смањење

мануелног рада не значи нужно мање радне снаге, већ може указивати на преусмеравање људи на обављање оних активности које стварају додатну вредност за предузеће.

Дакле, *ARIM* је концепт који економске, оперативне, аспекте квалитета и безбедности посматра заједно, а укључивањем анализе осетљивости додатно испитује стабилност резултата и у условима неизвесности. Робот се не третира као изолована инвестициона одлука, већ као динамичан процес. Додатна вредност модела произилази из комбинације квантитативне анализе података и експертског знања. Тиме се успоставља равнотежа између знања стручњака и расположивих података.

Коначно, допринос се огледа и у развоју софтверског алата који омогућава практичну примену предложеног концепта. Софтверска имплементација омогућава систематизацију улазних података, рачунање КПИ-јева и доношење одлуке на основу података. У суштини, *ARIM* повезује четири кључна елемента:

- Мултидимензионалну евалуацију,
- Анализу неизвесности и ризика,
- Одлуку,
- Итеративну адаптацију.

На овај начин, *ARIM* даје одговор на питање под којим условима треба имплементирати роботско решење, који су ризици такве одлуке, који фактори највише утичу на њен исход и шта треба унапредити уколико иницијално решење није задовољавајуће.

4. Софтвер за подршку одлучивању и операционализацију *ARIM* модела

За операционализацију *ARIM* модела развијен је софтвер како би се омогућила евалуација алтернативних роботских решења и доношење одлука заснованих на КПИ-јевима. Софтвер омогућава индустријским системима да утврде кретање перформанси система након имплементације роботског решења, уз избегавање потенцијалних проблема, а пре свега без потребе за реализацијом инвестиције. Дизајн софтвера је модуларан тако да не постоји потреба за модификацијом како би се имплементирао у различитим индустријским системима. Реконфигурацију софтвера могуће је извршити на једноставан начин. Податке је могуће ажурирати уколико дође до промене у производном процесу и на тај начин увидети промене у понашању система. Софтвер подржава итеративни процес евалуације и унапређења, што представља суштину приступа *Lean* роботике.

Развијени софтвер има улогу система за подршку одлучивању *(*енг. *Decision Support System – DSS)*. Софтвер омогућава систематичну процену имплементације роботских решења, и интегрише различите групе перформанси производног система. У овом поглављу је приказана архитектура система, избор технологија, као и начин на који су компоненте повезане у функционалну целину. Такође, приказано је како се улазни подаци трансформишу у КПИ показатеље, као и математичка операционализација показатеља.

4.1 Изазови процене оправданости имплементације роботског решења

Одлука о имплементацији роботског решења на место мануелне радне станице подразумева не само значајну инвестициону одлуку, већ и промену оперативне структуре, захтеве у ангажовању радне снаге, као и прилагођавање производног процеса. Да би се проценили ефекти имплементације роботског решења неопходно је посматрати целокупни експлоатациони период, а не само почетну инвестицију и уштеду на радној снази.

Процена исплативости инвестиције у роботско решење може бити погрешна уколико се заснива на очекиваним номиналним капацитетима роботског решења. Номиналне вредности не морају одговарати стварним перформансама роботског решења, пре свега због непланираних застоја, одржавања, губитака брзине или других утицаја који се могу десити у производном систему. Такође, имплементација роботских решења може допринети унапређењу ергономских услова и преусмеравању људских оператера на обављање креативнијих послова.

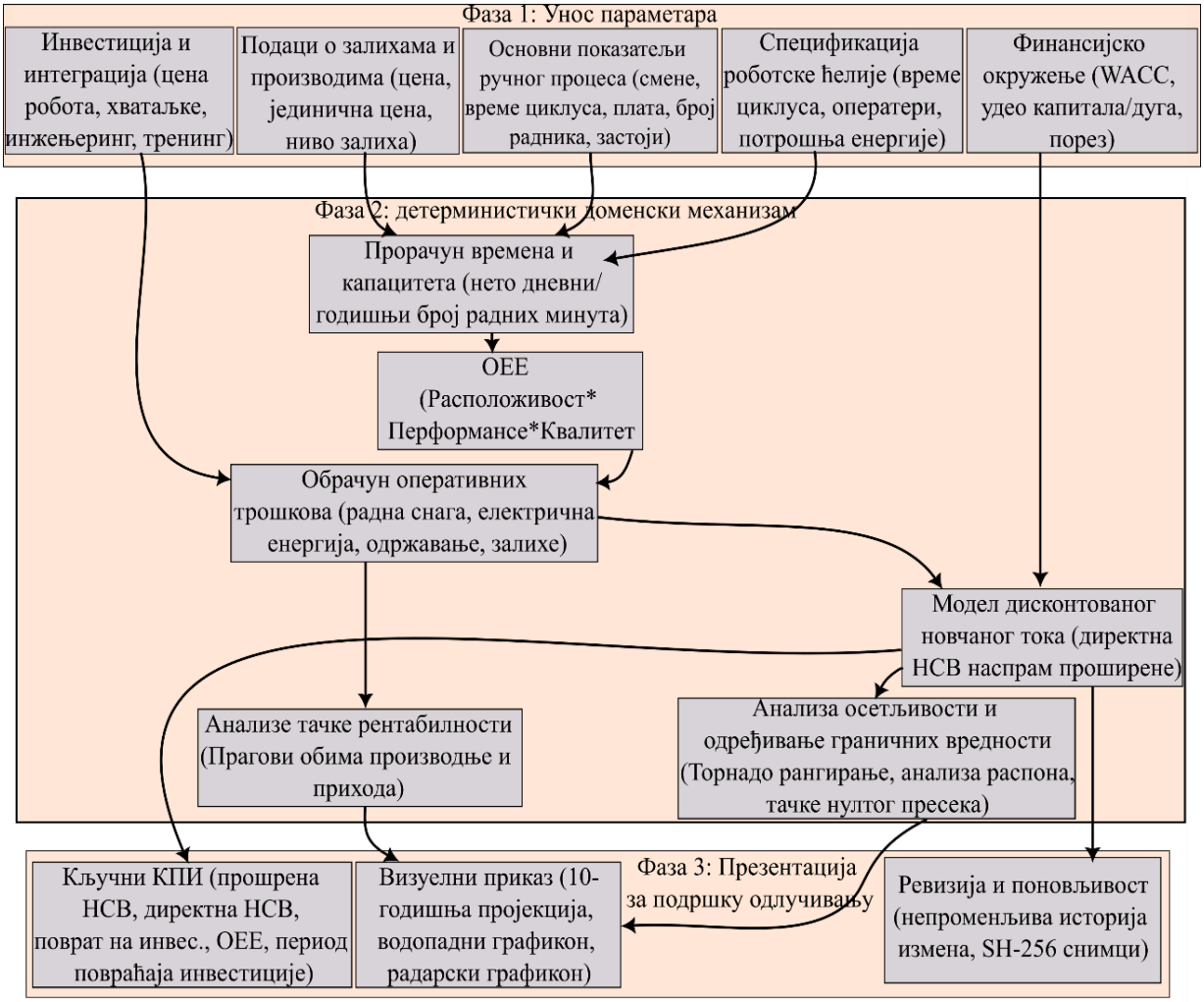
У складу са наведеним, имплементацију роботског решења један индустријски систем мора проценити као вишедимензионални проблем. Софтвер је развијен са циљем да обезбеди систематичну и свеобухватну подршку одлучивању о имплементацији роботских решења у *Lean* индустријским системима. Основни циљеви развоја софтвера приказани су у табели 15.

Табела 15 Циљеви развоја софтверског решења

Циљеви	Опис
Холистичко моделирање	Процена директних трошкова, смањења губитака, трошкова држања залиха, безбедности...
Одговор у реалном времену	Рачунарски механизам за ажурирање за мање од једне милисекунде.
Репродуктивност истраживања	Криптографско бележење стања процена уз коришћење канонског *SHA-256* хеширања улазних података.
Интуитивна визуелизација	Приказ *DCF* трајекторија, каскадних, стубичастих и торнадо дијаграма.
Имплементација у два режима	Платформа заснована на рачунарству у облаку за више корисника + самостална *HTML* верзија за рад без интернет везе.

4.2 Процес обраде информација од улаза до излаза

Развијени софтвер податке добијене у иницијалној фази анализе производног система трансформише у стратешке резултате кроз секвенцијални ток обраде. На слици 28 приказан је процес обраде информација од улаза до излаза.



Слика 28 Процес обраде информација

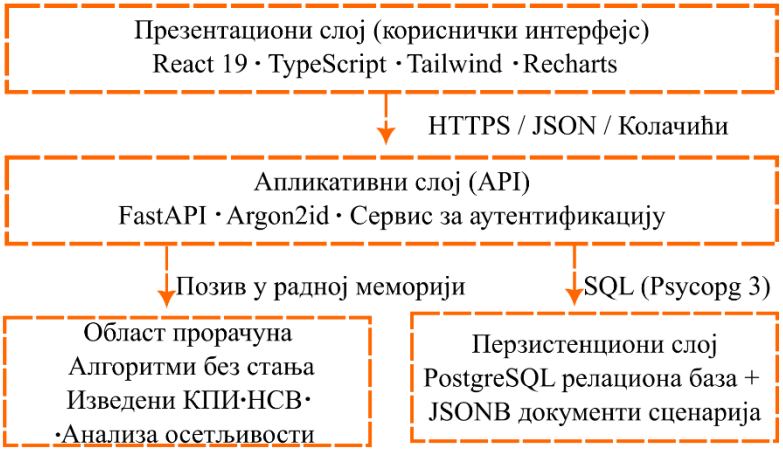
4.3 Структурни преглед програмског система

Софтвер је организован у следеће функционалне слојеве:

- **`Backend/calculation/`** - језгро за прорачун: садржи математичке формуле, правила за валидацију, *DCF* прорачуне и алгоритме за анализу осетљивости.
- **`Backend/modules/`** - апликативни сервиси: реализује аутентификацију корисника **`(auth)`**, управљање животним циклусом послова **`(jobs)`**, евидентирање активности и чување снимака извршених прорачуна **`(history)`**, као и претраживање каталога роботских решења **`(robots)`**.
- **`backend/api/`** - *HTTP* и серијализациони слој: дефинише *FastAPI* руте, *Pydantic* шеме за захтеве и одговоре, као и механизме за аутентификацију засновану на колачићима.
- **`src/engine/`** - верификационо језгро: садржи *TypeScript* имплементацију прорачунских формула која се користи за унакрсну проверу резултата прорачуна из backend дела система током аутоматизованог тестирања.
- **`src/components/isrc/lib/`** - кориснички интерфејс: садрже *React 19* компоненте корисничког интерфејса, форме за унос параметара, модалне дијалоге и *SVG* компоненте за визуелизацију података, реализоване уз употребу *TailwindCSS* и *Recharts* библиотека.

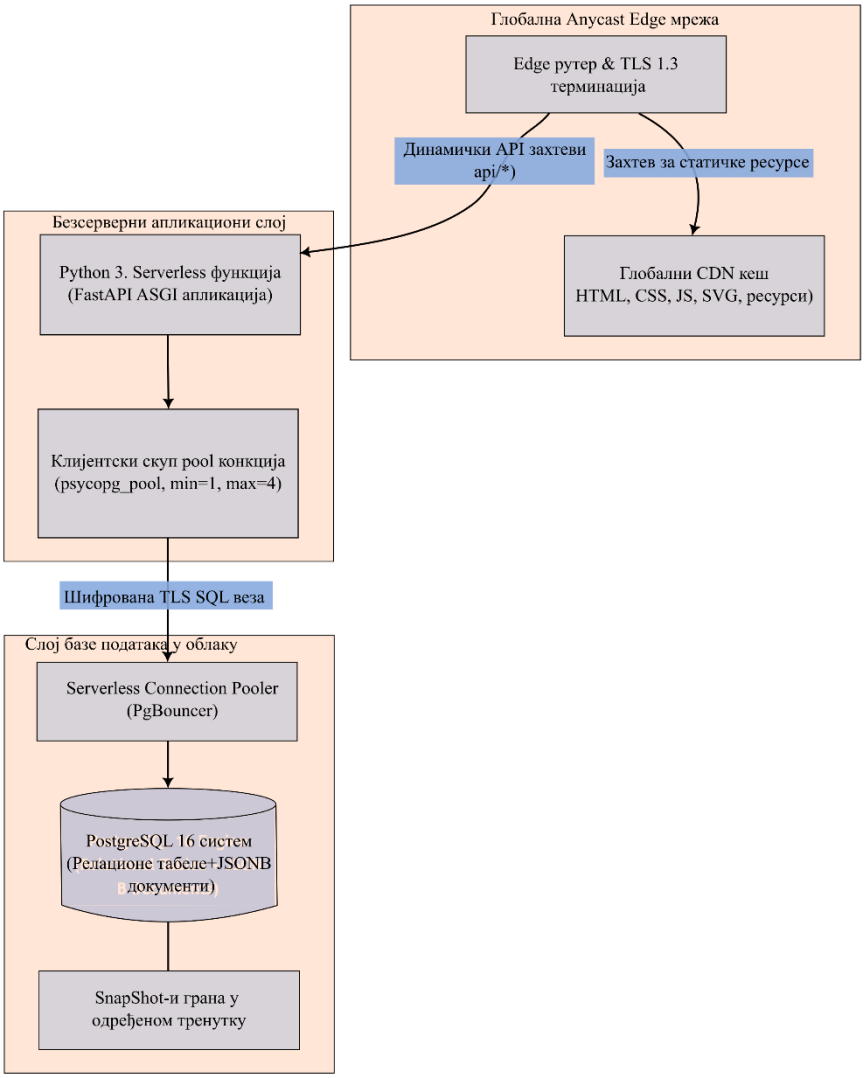
Софтвер је заснован на принципима архитектонског приступа портова и адаптера *(Ports and Adapters).* Архитектонски дизајн успоставља јасне границе између следећих слојева (слика 29):

- Презентациони слој: *React* веб клијент управља стањем корисничког интерфејса, формама за унос података и адаптивним визуелизацијама.
- Апликативни сервиси: *FastAPI* координише аутентификацију, перзистенцију података и пословне токове.
- Доменска логика: Чисти *Python* модули извршавају математичке и економске формуле без зависности од *HTTP* протокола или структуре базе података.
- Слој перзистенције: *PostgreSQL* обезбеђује релациони интегритет података и складиштење докумената у формату *JSONB*.



Слика 29 Архитектонски дизајн софтвера

Платформа је пројектована за извршавање у *cloud-native* окружењу, уз употребу *serverless* инфраструктуре (слика 30).



Слика 30 Cloud-native окружење и употреба serverless инфраструктуре.

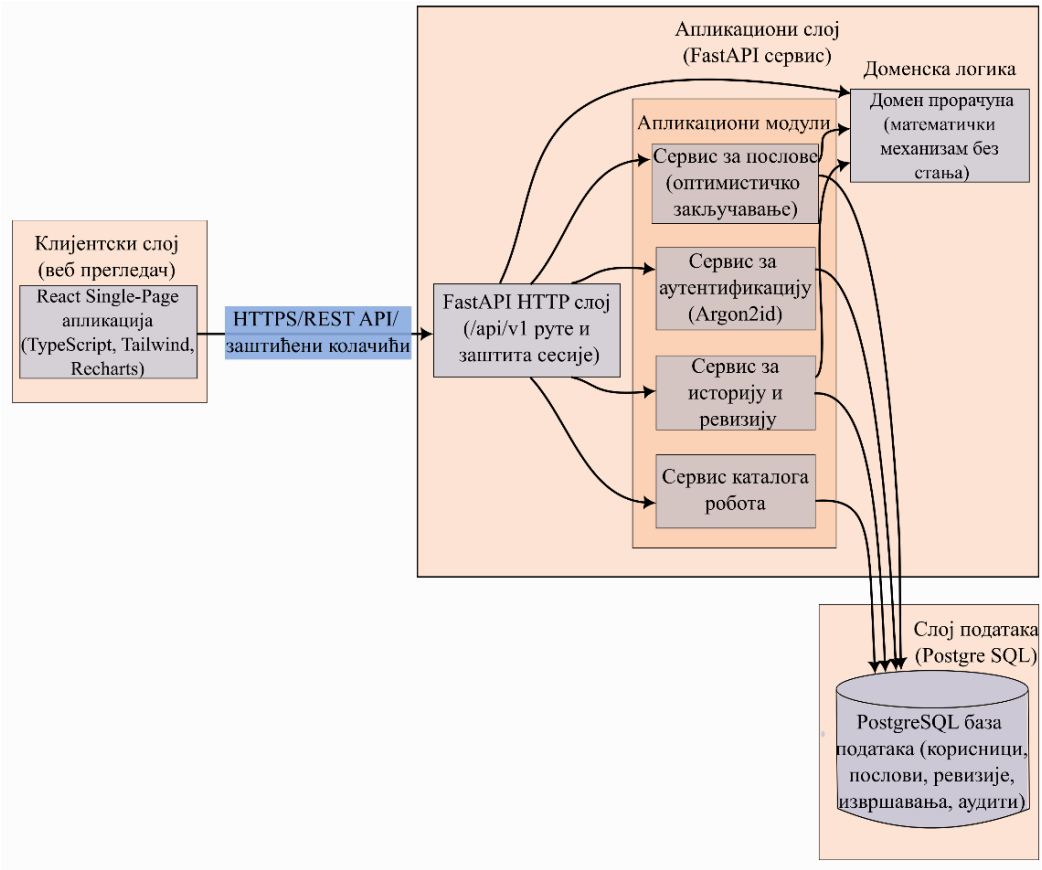
Кратко време учитавања могуће је без обзира на локацију корисника. *API* крајње тачке се извршавају у *Python 3.13* окружењу које се покреће на захтев и динамички се прилагођава оптерећењу. *PostgreSQL* база података смештена је на платформи *Neon*, која обезбеђује аутоматско скалирање рачунарских ресурса, управљање везама путем *PgBouncer*-а и снимке стања података засноване на гранама (енг. *branches*).

Дијаграм контекста система приказује однос платформе са спољним актерима и системима (слика 31).

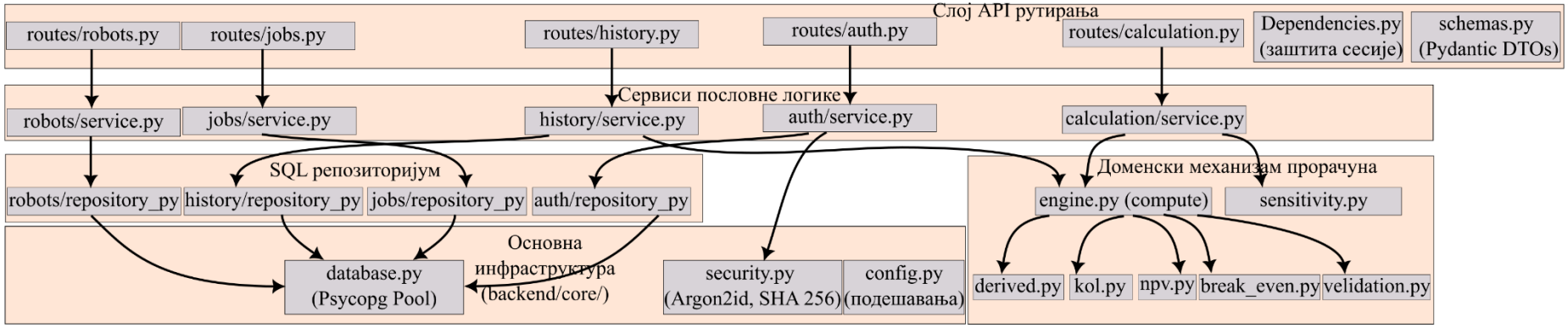


Слика 31 Дијаграм контекста система

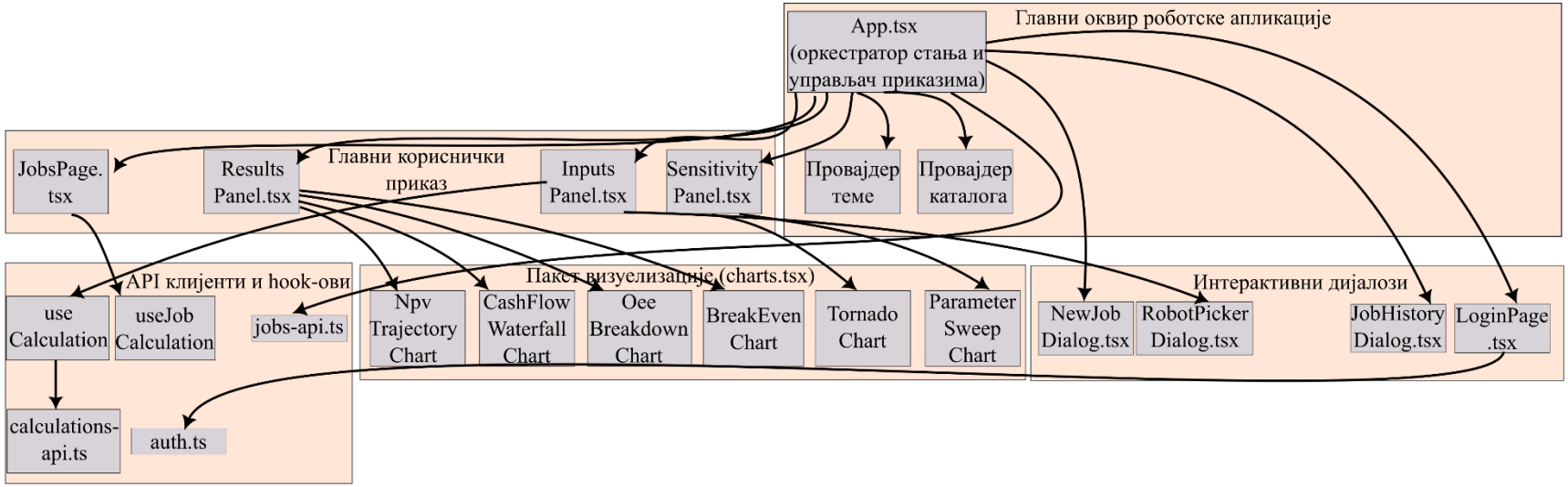
Дијаграм типа *Container* у *C4* моделу приказује декомпозицију платформе на њене примарне извршне целине (слика 32). На слици 33 приказан је модел компоненти *backend*-а, а на слици 34 модел компоненти *frontend*-а.



Слика 32 Декомпозиција платформе на примарне извршне целине



Слика 33 Модел компоненти backend-а



Слика 34 Модел компоненти frontend-а

Имплементација алата врши се у два оперативна режима:

- Обликована платформа за више корисника која је постављена на *cloud* инфраструктуру са *PostgreSQL* системом за пегзистенцију података, аутентификацију корисника, управљање више истовремених послова, непроменљивом историјом и могућностима тимског рада.
- Самостална извршна верзија за рад у изолованом окружењу (`robot-appraisal.html`) која се креира помоћу конфигурације `vite.standalone.config.ts` и додатка `vite-plugin-singlefile`.

У табели 16 дат је сумирани приказ коришћених технологија.

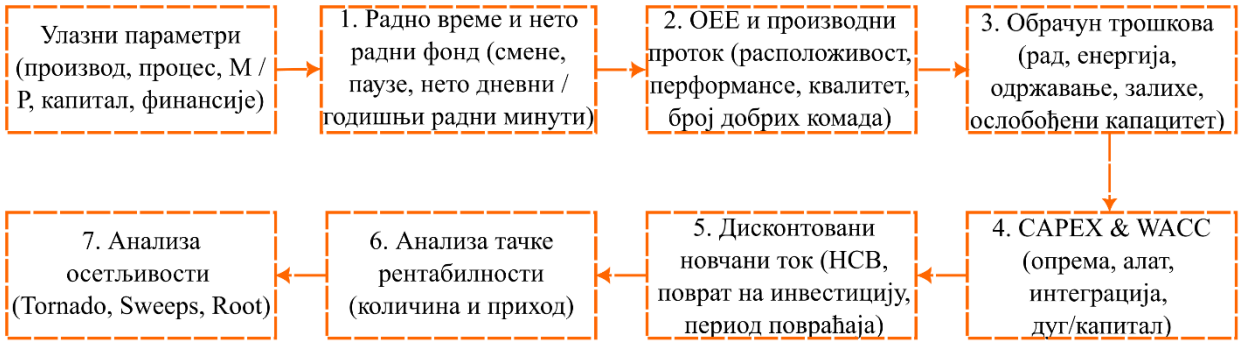
Табела 16 Коришћене технологије за развој софтвера

Архитектонска улога	Изабрана технологија/алат	Верзија	Намена и образложење избора
Кориснички интерфејс	*React*	19.0.0	Компонентно заснован реактивни кориснички интерфејс; ефикасно ажурирање *Virtual DOM*-а за брзе поновне прорачуне.
Језик (*frontend*)	*TypeScript*	5.7.2	Статичко типизирање, дефинисање интерфејса и референтно прорачунско језгро на клијентској страни.
Стилови и тема	*Tailwind CSS*	3.4.17	Систем дизајна заснован на токенима, подршка за тамну тему и смањење потребе за великим бројем прилагођених *CSS* класа.
Визуелизација	*Recharts*	2.15.0	Декларативна *SVG* библиотека за израду графикона, укључујући *DCF* криве, каскадне и торнадо дијаграме.
Апликативни сервер	*FastAPI*	0.115.6	Асинхрони *ASGI* оквир за *REST API* са уграђеном подршком за *OpenAPI* документацију.
Језик (*backend*)	*Python*	3.13.1	Основни програмски језик за прорачуне, моделирање података и реализацију математичке доменске логике.
Валидација	*Pydantic*	2.10.4	Строга валидација шема током извршавања, конверзија типова и *JSON* серијализација.
Драјвер базе података	*Psycopg 3*	3.2.3	Драјвер високих перформанси за *PostgreSQL* са подршком за управљање везама и бинарни пренос података.
Систем за управљање базом података	*PostgreSQL (Neon)*	16+	Релациона база података усаглашена са *ACID* принципима, са подршком за складиштење докумената у формату *JSONB*.
Хеширање лозинке	*Argon2id (*pwdlib*)*	Latest	Криптографско хеширање лозинки отпорно на нападе засноване на великој потрошњи меморије и *GPU* ресурса.

Технологије су изабране на основу захтева система у погледу перформанси, поузданости прорачуна, одрживости програмског кода, могућности тестирања и безбедности података. Кориснички интерфејс, апликативни сервиси, доменска логика и слој за складиштење могу се развијати и тестирати независно, као и уз јасно дефинисане интерфејсе између појединачних компоненти.

4.4 Математичка и оперативна логика

Математичко прорачунско језгро процењује оправданост аутоматизације кроз осам структурисаних фаза прорачуна, које су приказане на слици 35.



Слика 35 Структурне фазе математичког прорачунског језгра

Трајање операција у мануелним и роботизованим процесима чувају се у минутима као нумеричке вредности типа `float`, чиме се избегавају нејасноће и недоследности при форматирању времена.

За сваки тип процеса $p \in \{Manual\ (M), Robot\ (R)\}$ Дефинишу се следеће величине:

$$\text{Бруто дневно време: } T_{daily,gross} = N_{shifts} \times L_{shift}$$

$$\text{Нето дневно време: } T_{daily,net} = T_{daily,gross} - (N_{breaks} \times L_{break} \times N_{shifts})$$

$$T_{month,net} = T_{daily,net} \times D_{month}$$

$$T_{annual,net} = T_{month,net} \times 12$$

Где важи:

N_{shifts} – број смена дневно
L_{shift} – трајање смене у минутима
N_{breaks} – број пауза по смени
L_{break} – трајање паузе у минутима
D_{month} – број производних радних дана у месецу

За задато време циклуса по јединици $t_{cycle} > 0$, номинални обим производње израчунава се као:

$$V_{daily,nominal} = \frac{T_{daily,net}}{t_{cycle}}$$

$$V_{monthly,nominal} = V_{daily,nominal} \times D_{month}$$

$$V_{annual,nominal} = V_{monthly,nominal} \times 12$$

Укупно месечно време застоја (DT_{month}) обухвата непланиране застоје и планиране прекиде у раду:

$$DT_{month,M} = \left(f_{breakdown} \times t_{repair}\right) + \left(t_{planned,shift} \times N_{shifts} + t_{micro,shift} \times N_{shifts}\right) \times D_{month}$$

$$DT_{month,R} = \left(f_{service} \times t_{service}\right) + \left(t_{planner,shift} \times N_{shifts} + t_{micro,shift} \times N_{shifts}\right) \times D_{month}$$

Време рада: $T_{operating} = (0, T_{month,net} - DT_{month})$

Укупна ефикасност опреме процењује се у три димензије:

$$OEE = A \times P \times Q$$

$$A = \frac{T_{operating}}{T_{month,net}}$$

$$P = 1 - SpeedLoss$$

$$Q = 1 - DefectRate$$

$$DefectRate = \frac{Defects_{month}}{Volume_{monthly,nominal}}$$

Дневни обим производње коригује се у складу са факторима расположивости и перформанси. Годишњи обим производа се обрачунава узимајући у обзир губитке због неусклађености са захтевима квалитета.

$$Volume_{daily,effective} = \begin{cases} Volume_{daily,nominal} \times A \times P, & if\ options.oeeAdjustedThroughput = true \\ Volume_{daily,nominal}, & if\ options.oeeAdjustedThroughput = false \end{cases}$$

Годишња количина производа за продају израчунава се као:

$$Volume_{annual,good} = Volume_{daily,effective} \times D_{month} \times 12 \times Q$$

Обрачун трошкова производње и процена производног капацитета вршена је по следећим формулама:

Мануелни оператери: $C_{labour,M} = N_{workers} \times N_{shifts} \times S_{gross,M} \times 12$

$$R_{labour,M} = \frac{C_{labour,M}}{\frac{T_{annual,net,M}}{60}} [RSD/hour]$$

Оператери на роботу: $C_{labour,R} = N_{operators} \times N_{shifts,op} \times S_{gross,R} \times 12$

Ослобођени радни капацитет: $H_{manual} = (\frac{T_{annual,net,M}}{60}) \times N_{workers} \times N_{shifts}$

$$H_{robot,used} = (\frac{t_{workload,op} \times N_{shifts,op} \times D_{month} \times 12}{60}) \times N_{operators}$$

$$\Delta H_{freed} = max(0, H_{manual} - H_{robot,used})$$

$$V_{freed} = \Delta H_{freed} \times R_{labour,M}$$

Оперативни трошкови и трошкови залиха рачунају се на следећи начин:

Електрична енергија: $C_{electricity} = P_{robot,kW} \times (\frac{T_{annual,net,R}}{60}) \times Price_{kWh}$

Одржавање: $C_{maint} = S_{maint,monthly} \times 12$

Остали трошкови: $C_{other} = CAPEX \times r_{other}$

Трошак држања залиха: $C_{inv,p} = Inventory_p \times C_{unit} \times r_{carrying}$

Капиталне инвестиције и трошак финансирања рачунају се на следећи начин:

$$CAPEX_{base} = Price_{robot} + Price_{geippwe} + Cost_{additional}$$

$$CAPEX_{int} = \left(\frac{t_{eng}}{60} \times R_{eng}\right)\left(\frac{t_{tech}}{60} \times R_{tech}\right) + \left(\frac{t_{train}}{60} \times R_{train}\right)$$

$$CAPEX = CAPEX_{base} + \{CAPEX_{int}, if\ options.includeIntegrationInCapex = true\ 0, otherwise$$

$$WACC = (w_e \times k_e) + (w_d \times k_d \times (1 - t_{tax} \times I_{afterTax}))$$

При чему важи да је $w_e + w_d = 1.0$, k_e је цена капитала, k_d је каматна стопа позајмљеног капитала, t_{tax} је стопа пореза на добит предузећа, а $I_{afterTax}$ означава новчане токове након опорезивања.

Оперативна промена нето добити рачуна се као:

$$Revenue_p = Price_{sale} \times Volume_{annual,good,p}$$

$$COGS_p = C_{unit} \times Volume_{annual,gross,p}$$

$$\Pi_M = Revenue_M - COGS_M$$

$$\Pi_R = Revenue_R - (COGS_R + C_{electricity} + C_{other} + C_{maint})$$

$$\Delta\Pi = \Pi_R - \Pi_M$$

Нето садашња вредност (директни ефекти) процењује инвестицију на основу директног оперативног профита, ескалираног по годишњој стопи раста обима:

$$CF_0 = -CAPEX$$

$$CF_t = \Delta\Pi \times (1 + g)^{t-1} \times (1 - t_{tax} \times I_{afterTax}), \forall t \in \{1, \dots, H\}$$

$$CleanNPV = \sum_{t=0}^{H} \frac{CF_t}{(1 + WACC)^t}$$

Нето садашња вредност (проширени ефекти) рачуна се на следећи начин:

$$ExpandedInflow_t = \left|B_{margin,t} + B_{sick,t} + B_{inv,t} + B_{taxShield,t} + B_{freedLabour,t}\right|$$

$$ExpandedOutflow_t = \left|C_{elec,t} + C_{maint,t} + C_{other,t} + C_{interest,t} + C_{gripper,t}\right|$$

$$NCF_{expanded,t} = ExpandedInflow_t - ExpandedOutflow_t$$

$$ExpandedNPV = -CAPEX + \sum_{t=1}^{H} \frac{NCF_{expanded,t}}{(1 + WACC)^t}$$

Основни финансијски индикатори рачунају се као:

Повратна на улагање: $ROI = \frac{\Delta П}{CAPEX}$

Период повраћаја инвестиције: $PBP = \frac{CAPEX}{\Delta П}, defined\ when\ \Delta П > 0$

Индекс инвестиционе ефикасности: $IEI = \frac{CleanNPV}{CAPEX}$

Анализа тачке рентабилности рачуна се као:

$$FixedCosts_M = C_{labour,M} + C_{sick,M}$$

$$FixedCosts_R = C_{labour,R} + C_{sick,R} + C_{electricity} + C_{maint} + C_{other}$$

Ефективна продајна цена: $P_{eff,p} = Price \times (1 - DefectRate_p)$

Јединична маржа: $CM_p = P_{eff,p} - C_{unit}$

Обим који достиже тачку рентабилности: $Q_{BEP,p} = \frac{FixedCosts_p}{CM_p}$

Приход на основу рентабилности: $R_{BAP,p} = Q_{BEP,p} \times Price$

Једноваријантна торнадо анализа осетљивости спроведена је као анализа еластичности 40 осетљивих параметара при промени њихове вредности за ±20%, односно при фракционој промени δ=±0,20.

$$x_{i,low} = x_{i,0} \times (1 - \delta), y_{i,low} = metric(x_{i,low})$$

$$x_{i,high} = x_{i,0} \times (1 + \delta), y_{i,high} = metric(x_{i,high})$$

$$Swing\ Magnitude: \Delta y_i = |y_{i,high} - y_{i,low}|$$

Променљиве се сортирају у опадајућем редоследу према вредности Δy_i**,** како би се приказао торнадо дијаграм.

Развијени модел подржава осам експлицитно дефинисаних методолошких опција које омогућавају контролисану промену кључних претпоставки модела. На овај начин омогућена је анализа различитих методолошких приступа и испитивање њиховог утицаја на коначне економске показатеље инвестиције.

Свака опција има јасно дефинисану функцију и примењује се конзистентно кроз све релевантне компоненте модела, које су приказане у Табели 17.

Табела 17 Методолошке опције модела и њихов утицај на обрачун

Ознака	Методолошка опција	Функција
M1	Третман ослобођеног рада	Разликује стварни новчани прилив од неискоришћеног капацитета рада
M2	Прилагођавање производње показатељу укупне ефикасности опреме	Одређује да ли се приход заснива на обиму производње коригованом према укупној ефикасности опреме или на номиналном обиму производње
M3	Порески третман новчаних токова	Укључује порез на добит и порески ефекат трошка дуга у пондерисану просечну цену капитала
M4	Раздвајање раста и инфлације	Разликује физички раст обима производње од раста цена

Табела 17 (наставак) Методолошке опције модела и њихов утицај на обрачун

Ознака	Методолошка опција	Функција
M5	Укључивање интеграције у капиталне издатке	Укључује трошкове инжењеринга, техничара и обуке у почетну инвестицију
M6	Раздвајање боловања и повреда	Разликује општа боловања од повреда на раду које се могу спречити аутоматизацијом
M7	Ограничење тражњом	Ограничава годишњи обим продајне производње максималним капацитетом тржишта
M8	Заштита израчунавања периода повраћаја	Спречава појаву негативног периода повраћаја

4.5 Хибридна стратегија релационог и *JSONB* складиштења

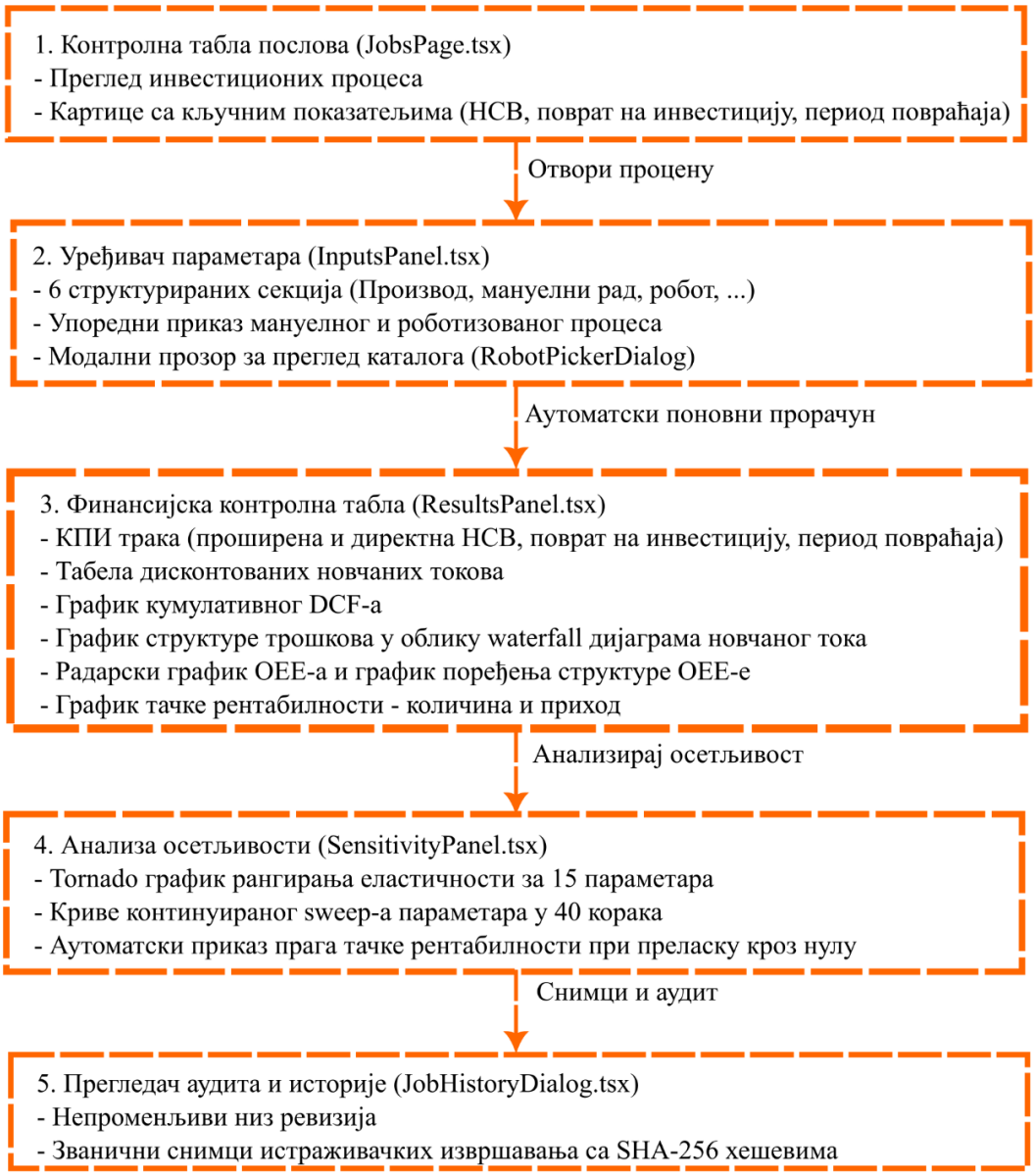
Слој за управљање подацима заснован је на хибридном моделу складиштења који комбинује предности релационог модела и флексибилности документно оријентисаног представљања података. Релациони део обезбеђује структурни интегритет и конзистентност података, док се променљиви делови улазних и излазних података чувају у формату *JSONB*.

Шема базе података организована је у четири функционална домена:

- Идентитет и сесије (`users`, `user_sessions`) - Овај домен управља корисничким налозима и активним сесијама.
- Пројекти процене (`appraisal_jobs`) - Овај домен представља основну јединицу пројекта процене којом управља корисник.
- Репродуктивност и ревизијски траг (`scenario_revisions`, `calculation_runs`, `audit_events`) - Свака потврђена измена сценарија генерише непроменљив запис о новој ревизији. Приликом евидентирања званичног истраживачког прорачуна чува се снимак стања сценарија заједно са семантичком верзијом модела и резултатима прорачуна.
- Каталози опреме (`robot_dataset`, `robots`) - Овај домен садржи нормализоване техничке спецификације индустријских робота, укључујући носивост, радни домет, поновљивост, потрошњу снаге и процењене цене. Подаци се заснивају на подацима из *Open Robot Database (ORD)* и техничкој документацији произвођача.

У систем је интегрисано 64 нормализована модела индустријских робота**,** при чему су подаци преузети *из Open Robot Database (ORD)* и референтног скупа података за *Mitsubishi RV-7FLL*. Нормализација података омогућава да се техничке карактеристике различитих модела представе у јединственој структури и користе у истом алгоритму економске процене. За потребе финансијског моделирања, процењене цене опреме конвертују се у хиљаде евра (*kEUR*) применом усвојеног планског девизног курса од 117,4 рсд/eur. Применом јединственог курса обезбеђује се конзистентност новчаних вредности у свим сценаријима који користе каталог опреме. Комуникација између клијентске и серверске компоненте система реализована је посредством *REST API* интерфејса. *API* је организован по функционалним подсистемима, чиме се одвајају операције аутентификације, управљања пројектима, сценаријима, историјом и подацима о опреми.

Коришћење развијеног модела организовано је кроз пет фаза економске процене инвестиције, које корисника воде од дефинисања улазних параметара и инвестиционог сценарија до израчунавања и интерпретације резултата. Фазе су приказане на слици 36.



Слика 36 Фазе економске процене инвестиције

Кориснички интерфејс је пројектован тако да омогући јасан приказ улазних параметара, поређење ручног и аутоматизованог начина производње и интерпретацију резултата економске анализе. Визуелни елементи су организовани тако да се различите категорије података и резултата међусобно јасно разликују. Посебна пажња посвећена је читљивости и приступачности интерфејса, уз примену релевантних смерница за контраст текста и позадине. Кориснички интерфејс обухвата неколико кључних приказа који подржавају целокупан процес економске процене. Почетни приказ омогућава преглед дефинисаних инвестиционих сценарија, док је посебан панел намењен уносу и поређењу параметара ручног и роботизованог процеса.

Резултати анализе приказују основне финансијске показатеље, укључујући нето садашњу вредност са директним ефектима и нето садашњу вредност са проширеним ефектима, поврат на улагање, период повраћаја инвестиције и укупну ефикасност опреме. Додатно се приказују пројекције дисконтованих новчаних токова и кумулативне нето садашње вредности. За подршку интерпретацији резултата користе се графички прикази структуре новчаних токова, анализа тачке прелома и анализа осетљивости.

Посебан приказ омогућава рангирање најзначајнијих променљивих путем торнадо дијаграма, као и испитивање нелинеарног одзива резултата променом појединачних параметара.

Систем такође омогућава избор индустријске роботске опреме из каталога према релевантним техничким карактеристикама, као и преглед историјских ревизија сценарија и претходно извршених прорачуна. Приказ корисничког интерфејса развијеног софтверског решења дато је у прилогу докторске дисертације.

4.6 Унакрсна провера конзистентности прорачуна

Како би се проверила математичка конзистентност, модел је проверен у две извршне средине. За исти скуп улазних параметара упоређени су резултати. Разлика која је прихваћена ограничена је са:

$$|R_{Python}(S) - R_{TypeScript}(S)| < 10^{-6}$$

Проверене су основни математичке и економске интерваријанте модела, и то:

- Да ли повећање продајне цене, уз остале непромењене услове, доводи до повећања нето садашње вредности:

$$\frac{\partial Price}{\partial NPV} > 0$$

- Да ли повећани капитални издатак доводи до смањења нето садашње вредности

$$\frac{\partial CAPEX}{\partial NPV} < 0$$

- Да ли показатељи расположивости, перформанси, квалитета и укупне ефикасности опреме остају у интервалу [0,1]?
- Да ли гранични случајеви (нпр. Нулто време циклуса, расположиво радно време,...) не доводе до неконтролисаног прекида прорачуна.

Систем је додатно тестиран у погледу контроле приступа и интегритета корисничких података. На овај начин је обезбеђено да корисници могу приступити искључиво сопственим сценаријима и резултатима.

Развијени софтвер омогућава да се промене у производном процесу директно повежу са новчаним токовима и показатељима инвестиционе оправданости. Софтвер поред основног финансијског сценарија омогућава и разматрање додатних стратешких и оперативних ефеката аутоматизације. Систематска анализа осетљивости кључних параметара представља додатни методолошки допринос. Поред тога, могуће је идентификовати параметре који имају највећи утицај на економску оправданост инвестиције. Обезбеђена је провера математичке конзистентности и економске логике.

Практичан значај развијеног модела, осим што операционализује *Robotic Startup Cycle ARIM* модела омогућава и систематично и транспарентно доношење инвестиционих одлука.

Иако модел обухвата велики број техничких и економских параметара, свакако постоје могућности за његово проширење. Будућа истраживања могу укључити стохастички приступ у коме би се неизвесност улазних параметара представила одговарајућим расподелама вероватноће. На тај начин могла би се проценити и расподела могућих исхода инвестиције.

5. Емпиријска валидација *ARIM* модела

Након развоја и итеративног унапређења *ARIM* модела, извршена је његова валидација у реалном индустријском окружењу. Циљ валидације био је утврђивање способности модела да подржи доношење одлуке о имплементацији роботског решења од иницијалне анализе производног процеса до пилот имплементације и поређења очекиваних и реализованих перформанси. Валидација је спроведена као студија случаја. Студија случаја је одабрана као приступ како би се модел посматрао у стварном контексту и даље анализирао начин на који се предложене методе и механизми понашају у условима реалног производног система.

Валидација је подразумевала примену кључних фаза модела при чему се проверавала не само функционалност појединачних елемената модела већ и њихова повезаност у оквиру јединственог процеса доношења одлуке. У контексту *DSR* парадигме студија случаја представља основу за демонстрацију и емпиријску евалуацију развијеног артефакта – *ARIM* модела.

Посебна пажња посвећена је поређењу *ex ante* и *ex post* резултата како би се проценило у којој мери модел може да предвиди понашање роботског решења у реалним условима, као и да се идентификују разлике између претпостављених и стварно остварених перформанси. У том смислу, валидација обухвата три аспекта:

- Валидацију применљивости модела,
- Валидацију одлуке,
- Валидацију предиктивне способности.

Валидација применљивости модела анализира да ли се предложене фазе и методе могу применити на реалан производни процес без обзира на индустрију и величину система. Валидација одлуке преиспитује процес одлучивања и довођење до технички, економски и оперативно оправданог роботског решења. На крају, валидацијом предиктивне способности се утврђује у којој мери се перформансе предвиђене пре имплементације роботског решења поклапају са перформансама реализованим у реалном производном окружењу. Посебно је значајан аспект смањења неизвесности пре инвестирања, идентификација ризика као и корекција решења кроз итеративни приступ уколико за тим постоји потреба.

С обзиром да је валидација спроведена на једној студији случаја, резултати се не тумаче као статистичка потврда универзалне применљивости развијеног модела. Насупрот томе, студија случаја има за циљ да покаже да је модел функционалан и применљив без обзира на то који индустријски систем је изабран, а у условима у којима је развијен.

5.1 Опис компаније

Емпиријска валидација предложеног *ARIM* модела спроведена је у производном индустријском систему чија је основна делатност производња емајлираног посуђа. Компанија се бави производњом различитог посуђа за припрему хране, судопера, бојлера, производа од ливених полимера, картонске амбалаже и делова за аутоиндустрију. Иако је компанија проширила производњу на различите индустријске производне програме, производња емајлираног посуђа представља њену основну делатност.

У оквиру компаније постоји висок степен интеграције производних процеса, ефикасно управљање материјалним токовима и координација производних активности. Производи се пласирају како на домаће тако и на иностранo тржиште. Производни амбијент карактеришу високи захтеви у погледу квалитета производа, поузданости процеса и способности брзог прилагођавања захтевима купаца.

Производни систем заснован је на *Lean* принципима. У претходном периоду имплементиран је већи број *Lean* алата у циљу елиминисања расипања, повећања продуктивности и унапређења квалитета. Ипак, велики број операција подразумева понављајуће покрете оператера, ергономско оптерећење и ограничену флексибилност.

Наведене карактеристике чине овај индустријски систем погодним за валидацију предложеног *ARIM* модела. Производња омогућава израду великог броја различитих варијанти производа, комбинације боја, декорација и завршних елемената. Самим тим, неопходна је флексибилност производног система. Производни процеси садрже више потенцијалних кандидата за роботизацију, док истовремено постоје и ограничења у виду ограниченог инвестиционог буџета, потребе за брзим прилагођавањем и задржавање високог степена флексибилности. Оваква структура ствара изазов за планирање и имплементацију роботског решења јер се решење не процењује само на основу повећања продуктивности већ и на основу обезбеђивања и задржавања неопходне флексибилности. Компанија је као таква селектована као репрезентативан пример за испитивање применљивости предложеног модела у реалним индустријским условима. Резиме карактеристика компаније дат је у табели 18.

Табела 18 Компанија у којој је спроведена студија случаја

Карактеристика	Опис
Делатност	Производња емајлираног посуђа
Тип производње	Серијска производња
Ниво аутоматизације	Делимично аутоматизован производни систем
Lean концепт	Имплементирани *Lean* алати
Главни изазови	Ручна манипулација, ергономија, транспорт материјала, варијабилност
Разлог избора компаније	Репрезентативан пример *Lean* производног система погодног за имплементацију роботских решења

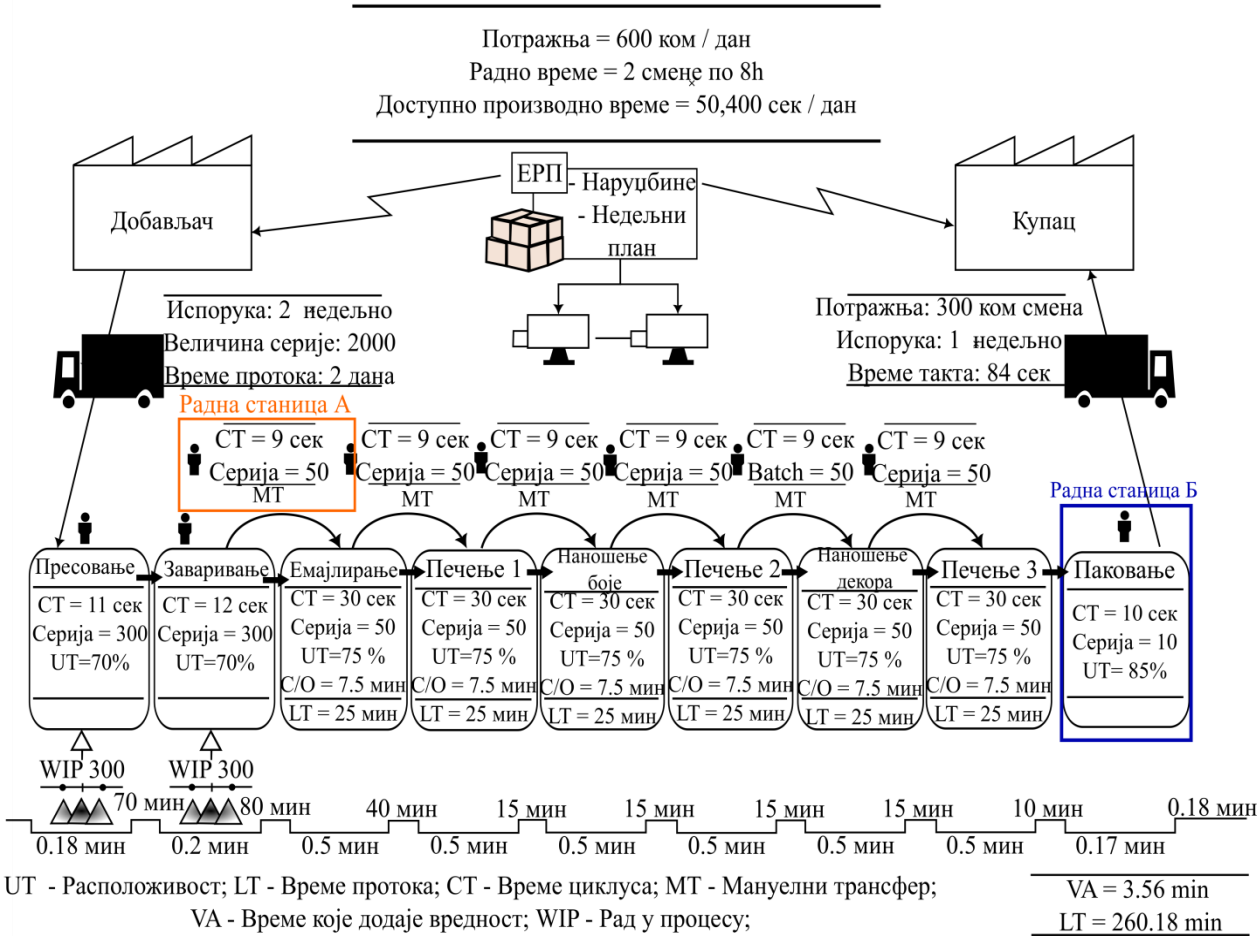
Компанија такође подржава вредност која истиче значај запослених, људи на првом месту. У складу са тим, људски ресурси посматрају се као незаменљив ресурс.

Емпиријска валидација спроведена је на полуаутоматској производној линији за емајлирано посуђе. Ову полуаутоматску линију карактерише делимична аутоматизација, радно интензивне операције и ограничена флексибилност у прилагођавању флуктуацијама потражње.

Одабрана производна линија се састоји од више радних станица. Радне станице имају различите нивое ручног рада, аутоматизације и интеракције између оператера и машина. Ово индустријско окружење пружа репрезентативан контекст за процену *ARIM*-а, јер укључује понављајуће ручне задатке и ергономски захтевне операције које су типични изазови за индустријске системе који разматрају имплементацију роботских решења.

5.2 Анализа тренутног стања

Први корак примене *ARIM* модела подразумева анализу постојећег производног процеса. Циљ ове фазе јесте идентификовање оних радних станица које представљају потенцијалне кандидате за аутоматизацију. Анализа постојећег производног процеса врши се мапирањем тока вредности. Имплементација овог *Lean* алата омогућава приказ материјалног и информационог тока као и идентификовање оних активности које додају, односно не додају вредност. Мапа тока вредности производне линије емајлираног посуђа приказана је на слици 37.



Слика 37 Мапа тока вредности почетног стања у индустријском систему

Производни процес емајлираног посуђа састоји се од девет корака, чији је ниво аутоматизације на различитом нивоу. Ти кораци су:

- Пресовање,
- Заваривање,
- Емајлирање,
- Печење (1),
- Наношење боје,
- Печење (2),
- Наношење декора,
- Печење (3),
- Паковање.

Пресовање и заваривање су процеси који нису организовани као континуални ток, већ као серијска производња. Првенствено се производи одређена количина полуготових делова која се складишти у залихама између фаза. Након производње дефинисане количине полуготових делова прелази се на наредну операцију. Када се заврши

производња полуготових делова планираних за једну смену, врши се транспорт до линије за емајлирање.

Наношење емајла је операција која се реализује на високом степену аутоматизације. Линија обезбеђује равномерно наношење емајла на површину производа, након чега се производи ручно пребацују у пећ у којој се врши термичка обрада. Оператер преузима производ са транспортне линије након емајлирања и поставља их на транспортер који уводи производе у пећ. Након завршетка процеса печења оператер поново ручно преузима производе и пребацује их на следећи део производне линије.

Исти принцип ручне манипулације примењује се и између операција наношења боје, декора и печења, све до паковања. Након наношења боје производи се ручно пребацују у другу пећ, а након тога опет ручно до линије за наношење декоративног слоја. Након завршетка декорације следи и треће печење. Када се заврши последње печење следи фаза паковања.

Паковање се такође обавља ручно. Оператер слаже дефинисан број производа у кутије након чега се на палетама производи транспортују даље за испоруку.

Дакле, производни процес представља комбинацију аутоматизованих технолошких операција и мануелних активности. Док су процеси емајлирања, наношења боје, декорације и печења високо аутоматизовани, прелазак производа између појединих производних целина ослања се на физички рад оператера, као и процеси пресовања, заваривања и паковања.

Анализа времена циклуса показала је да наведене операције у случају повећаног производног оптерећења могу представљати ограничење производног процеса. Капацитет аутоматске линије зависи од континуалног снабдевања производима. Сваки застој или успоравање ручне манипулације утиче на искоришћеност производног система.

Када је реч о радним местима која подразумевају мануелно пребацивање емајлираног посуђа, радник током читаве смене обавља велики број идентичних покрета који укључују сагињање, узимање производа, подизање и постављање производа на транспортер. Оператери приликом извршавања ових операција седе. Приликом паковања, оператер такође обавља понављајуће покрете.

Како је приказано на слици 26, купац доставља поруџбине производном систему, након чега систем за планирање ресурса предузећа, ЕРП *(eng. Enterprise Resource Planning - ERP),* врши планирање производње и генерише недељни производни план, а поруџбине се шаљу добављачу. Купац дневно захтева производњу од 600 комада. Производња је организована у две смене од по 8 часова, уз две паузе од по 20 минута по смени. Расположиво производно време је 52.800 секунди. Време такта које се односи на брзину којом производни систем мора да производни како би захтеви купаца били задовољени рачуна се по формули:

$$\text{Време такта} = \frac{\text{Расположиво производно време}}{\text{Потражња купаца}}$$

Дакле,

$$\text{Време такта} = \frac{52.800}{600} = 88 \text{ секунди}$$

Дакле, један производ мора бити произведен на сваких 88 секунди. У односу на време такта анализирају се времена циклуса свих производних операција.

Добављачи врше испоруку два пута недељно у серијама од 2.000 комада. Сам начин снабдевања потенцијално може довести до већих почетних залиха због великих количина материјала које улази у систем.

Све производне операције које су претходно наведене описане су параметрима времена циклуса (енг. *Cycle time - CT*), величином серије (енг. *Batch*), расположивошћу опреме (енг. *Uptime*), времена промене алата (енг. *Changeover – C/O*) и временом проласка (енг. *Lead time - LT*). Ови параметри за сваку производну операцију дати су у табели 19.

Табела 19 Параметри производних операција

Процес	*CT* (сек)	Серија	*Uptime* (%)	*C/O* (мин)	*LT* (мин)
Пресовање	11	300	70	-	-
Заваривање	12	300	70	-	-
Емајлирање	30	50	75	7,5	25
Печење 1	30	50	75	7,5	25
Наношење боје	30	50	75	7,5	25
Печење 2	30	50	75	7,5	25
Наношење декора	30	50	75	7,5	25
Печење 3	30	50	75	7,5	25
Паковање	10	1	85	-	-

На основу података приказаних у табели 19 може се уочити да су времена циклуса производних операција мања од 88 секунди што указује да капацитет појединачних процеса не представља ограничење производног система. Најдуже време циклуса имају емајлирање, наношење боје и декора, као и свака ставка печења. Без обзира, и најдуже време циклуса у производном процесу мање је од захтеваног времена такта.

Са друге стране, расположивост опреме од свега 70% у процесу пресовања и заваривања, као и од 75% код других процеса или 85% на процесу паковања указује на честе застоје, отказе и потребу за одржавањем. Ниска стопа расположивости опреме представља потенцијални извор губитака.

Такође, време промене алата од 7,5 минута указује на нижу флексибилност производње и потенцијални проблем у случају производње серија мањег обима.

Између процеса пресовања и заваривања јављају се значајне међузалихе од по 300 комада. Ове залихе представљају производе који су изашли из претходне операције, али још увек нису ушли у наредни процес. Ове залихе је потребно свести на минимум јер продужавају укупно време проласка производа, заузимају производни простор, везују финансијска средства и смањују флексибилност производње.

На временској линији приказане су активности које додају вредност и времена чекања током којих производи чекају да пређу у наредну операцију. Времена чекања идентификована у производном процесу дати су у табели 20.

Табела 20 Времена чекања процеса емајлирања посуђа

Процес	*CT* (мин)
Пресовање	70
Заваривање	80
Емајлирање	40
Печење 1	15
Наношење боје	15
Печење 2	15
Наношење декора	15
Печење 3	10
Паковање	70

Збир свих времена обраде износи 3,56 минута (енг. *Value added - VA*), док укупно време проласка производа кроз производни систем износи 260,18 минута. Дакле, производ се обрађује свега 1,37% времена од укупног времена које проведе у производном систему. Остало време (98,63%) односи се на активности које не додају вредност, а могу укључивати чекање, транспорт, складиштење и формирање међузалиха.

Овај резултат је типичан за традиционално организоване производне системе и јасно указује на значајан потенцијал за примену *Lean* метода.

Анализом мапе тока вредности идентификовани су бројни извори губитака. Један од најзначајнијих *Lean* губитака представљају губици услед прекомерне производње и најчешће овај губитак условљава све остале губитке. До ове ситуације долази када се у производном систему производи више производа него што је потребно. Пресовање и заваривање представљају две операције у којима се производња врши у серијама од 300 комада. Ово доводи до акумулације производа између процеса јер се наредне операције раде у серијама од 50 комада. Осим тога, добављачи врше испоруку материјала два пута недељно у серијама од 2.000 комада. Ово такође представља велики улазни инвентар, што утиче на повећање времена проласка производа, веће трошкове складиштења и потребан производни простор као и више везаног капитала. Иако је производња у складу са захтевима купаца, систем није прилагођен принципима континуалног тока и производње према стварној потражњи (*Pull* систем). Уочени губици значајно смањују укупну ефикасност производног система и продужавају укупно време потребно да производ прође кроз производни систем.

Чекање представља другу категорију идентификованих губитака и односи се на време које на конкретној мапи тока вредности износи више од 4 сата. Највећа времена чекања су управо након процеса пресовања и заваривања. Након пресовања јавља се чекање од 70 минута, а након заваривања чекање од 80 минута. Након осталих операција у оквиру овог производног процеса јављају се чекања у трајању од 10 до 40 минута. Губици услед чекања представљају један од најизраженијих проблема анализираног производног система.

Транспорт се посматра као активност која производу не додаје вредност. Током самог транспорта не врши се никаква физичка трансформација производа. Транспорт материјала на овој производној линији врши се ручно. Сам ручни транспорт продужава време производње, повећава вероватноћу оштећења производа, захтева ангажовање додатних оператера и на крају повећава и укупне трошкове производње. Поред наведеног, ручни транспорт материјала између операција отежава успостављање континуалног производног тока и представља извор додатних потенцијалних кашњења.

Када је реч о прекомерној обради као губитку који из перспективе купаца не додаје вредност производу, не може се рећи да ниједна од производних операција представља прекомерну обраду, јер су све технолошке операције укључене у производни процес неопходне за добијање финалног производа. Међутим, дуга времена промене алата код већине операција указују да постоји потенцијал за примену *SMED* методологије, чиме се време које не додаје вредност смањило без измене саме производне методологије.

Губици који настају услед непотребних кретања оператера нису присутни, али само физичко оптерећење радника које настаје приликом премештања серија производа и паковања су изузетно значајна и требало би их смањити.

Иако губици услед дефеката нису велики, постоји незнатан ниво присуства појаве дефектних производа, што није директно назначено у мапи тока вредности, али је забележено у подацима прикупљеним у фабрици.

Савремени *Lean* концепт препознаје и осми губитак који се односи на недовољно коришћење знања, искуства и способности запослених. Међутим, чињеница да се транспорт изводи ручно и да се процес ослања на велике серије може указивати на потенцијал за организациона побољшања која би укључила веће учешће оператера у оптимизацији производног тока. У табели 21 приказани су идентификовани *Lean* губици у посматраном индустријском систему.

Табела 21 Идентификовани Lean губици

***Lean* губитак**	**Уочено на *VSM***	**Последице**
Прекомерна производња	Серије од 300 комада	Формирање залиха недовршене производње и дуже време проласка
Чекање	Време протока = 260,18 мин Време које додаје вредност = 3,56 мин	Велики удео времена без додавања вредности
Транспорт	Ручни транспорт између операција	Додатно време и могућност оштећења
Залихе	Залихе недовршене производње = 300 + велике улазне серије	Везивање капитала и дуже време протока
Непотребна обрада	Време промене алата = 7,5 мин	Смањена флексибилност производње
Непотребни покрети	Ручно премештање материјала	Веће оптерећење оператера
Дефекти	Нису директно приказани	Потребна додатна анализа квалитета
Неискоришћен потенцијал људи	Није приказан на *WSM*	Захтева организациону анализу

Најзначајнији губици везују се за чекање, прекомерне залихе, ручни транспорт и производњу у великим серијама. Ово директно утиче на продужење времена проласка производа кроз систем и смањење укупне ефикасности производног процеса. Иако постоји значајан простор за унапређење, може се рећи да је фокус на увођење континуалног тока, смањење величине серије, оптимизацију транспорта, скраћење времена промене алата, повећање расположивости опреме и примене *Pull* система.

Како је предмет истраживања ове докторске дисертације избор радне станице на којој је оптимално извршити имплементацију роботског решења, у обзир су узети критеријуми као што су висок удео ручног рада, понављајући покрети, могућност роботског хватања и стабилан процес.

Посебно је значајно нагласити активности које карактерише висок удео ручног рада. Прва активност јесте ручни трансфер материјала између производних операција, а друга активност је процес паковања. Ручни трансфер материјала налази се између производних операција и подразумева велики ергономски напор оператера, непотребне покрете и додатно време чекања. Паковање је завршни процес и такође подразумева велики физички напор оператера. Ове активности су понављајуће, стандардизоване и ергономски изузетно захтевне. Аутоматизација ових активности има потенцијал да смањи губитке услед транспорта, непотребних покрета, чекања и варијабилности процеса. У наставку истраживања спроведена је анализа за обе идентификоване позиције са циљем избора оптималне за имплементацију роботског решења.

5.3 Иницијална процена

У првој фази идентификоване су две радне станице за потенцијалну имплементацију роботског решења. У табели 22 дат је преглед карактеристика ових радних станица.

Табела 22 Радне станице идентификоване као потенцијалне за имплементацију роботског решења

Карактеристика	Радна станица А	Радна станица Б
Назив операције	Ручни трансфер полупроизвода између производних процеса	Паковање готовог производа
Позиција у производном току	Између технолошких операција	Последња операција пре испоруке
Тип активности	Интерни транспорт и манипулација	Манипулација, оријентација и паковање
Да ли додаје вредност?	Не	Делимично
Тип манипулације	*Pick-and-Place*	*Pick-and-Place*
Учесталост понављања	Веома висока	Висока
Ниво стандардизације покрета	Висок	Средње висок
Варијабилност процеса	Мала	Средња
Укљученост оператера	Континуирана	Континуирана
Потреба за визуелном контролом	Ниска	Средња
Интеракција са другим процесима	Висока	Средња
Ергономско оптерећење	Високо (учестало подизање и преношење)	Средње до високо (понављајући покрети руку)
Потенцијал за роботизацију	Висок	Висок

На основу анализе мапе тока вредности идентификовано је више активности које могу бити предмет аутоматизације. Међутим, како нису све активности погодне за имплементацију роботских решења због неопходности коришћења специјализоване опреме или других ограничења, сама имплементација роботских решења не би значајно допринела побољшању перформанси производног система. Заједничка карактеристика одабраних радних станица (ручни трансфер материјала и паковање) јесте велики број понављајућих циклуса и стандардизована природа задатака. Обе станице подразумевају операције типа *pick-and-place,* али ручни трансфер не додаје вредност производу, док је паковање операција која је неопходна за испоруку готовог производа купцу. У табели 23

дат је преглед елемената радних станица које их чине погодним за имплементацију роботског решења.

Табела 23 Елементи радних станица погодни за имплементацију роботског решења

Параметар	Радна станица А	Радна станица Б	Значај за роботизацију
Понављајући покрети	Веома високи	Високи	Висок
Комплексност хватања	Ниска	Средња	Средњи
Захтевана прецизност	Средња	Висока	Средњи
Потреба за оријентацијом производа	Ниска	Висока	Средњи
Варијабилност производа	Ниска	Средња	Висок
Захтев за машинским видом	Није неопходан	Пожељан	Средњи
Могућност колаборативног рада	Висока	Висока	Висок
Потенцијал смањења времена циклуса	Висок	Средњи	Висок
Потенцијал елиминације *Lean* губитака	Веома висок	Средњи	Веома висок
Очекивана сложеност интеграције	Ниска	Средња	Средњи

Из претходне табеле може се видети да обе радне станице имају карактеристике које их чине погодним за имплементацију роботског решења. Међутим, радна станица А омогућава једноставнију интеграцију јер има једноставнију кинематику кретања, мању варијабилност и директно је повезана са елиминацијом активности које не додају вредност. Са друге стране, радна станица Б захтева већу прецизност позиционирања, интеракцију са амбалажом и већу варијабилност оријентације производа.

Са становишта *Lean* филозофије, радна станица А има потенцијал да смањи више категорија губитака, док се код радне станице Б примарни ефекти очекују пре свега у области ергономије. У табели 24 дат је преглед испуњености прелиминарних услова за имплементацију роботског решења на ове две радне станице.

Табела 24 Прелиминарни услови за имплементацију роботског решења кандидатских радних станица

Услов	Да ли је испуњен?	А	Б
Висок удео ручног рада	✔	✔	✔
Lean губитак је идентификован *VSM* анализом	✔	✔	✔
Операцију је технички могуће роботизовати	✔	✔	✔
Робот може да преузме >70% активности	✔	✔	✔
Постоји довољно простора за роботску ћелију	✔	✔	✔
Не захтева измену технолошког процеса	✔	✔	✔

Да би се одабрала радна станица за имплементацију роботског решења коришћено је вишекритеријумско одлучивање. Поред оперативних, у обзир су узете економске, ергономске, перформансе квалитета и аспекти флексибилности производног система. Након идентификовања потенцијалних радних станица као и методе која ће бити коришћена, дефинисани су критеријуми на основу којих ће се вршити вредновање. Преглед критеријума дат је у табели 25.

Табела 25 Критеријуми за оцењивање алтернатива применом WSM методе

Критеријум	Опис	Тип критеријума	Разлог укључивања
Оперативни	Производни капацитет, стабилност процеса, варијабилност циклуса	*Benefit*	Робот треба да побољша продуктивност
Финансијски	Трошкови имплементације, очекиване уштеде	*Cost*	Економска оправданост инвестиције
Квалитет	Стопа дефеката, стабилност квалитета	*Benefit*	Потенцијал побољшања квалитета
Ергономија	Ергономија, физичко оптерећење оператера	*Cost*	Тренутно ергономско стање
Флексибилност	Прилагодљивост будућим изменама	*Benefit*	Одрживост решења

Оперативни критеријуми се односе на показатеље који описују у којој мери радна станица обезбеђује стабилан и ефикасан процес производње. Разматрају се параметри као што су капацитет производње, време циклуса, варијабилност процеса, утицај станице на континуитет производног тока. Како имплементација роботског решења треба да допринесе повећању продуктивности, смањењу времена извршења и већој стабилности процеса, оне радне станице код којих долази до повећања ових параметара добијају веће вредности.

Економски критеријуми имају за циљ финансијску процену оправданости имплементације роботског решења. Када је реч о економским критеријумима, разматрају се инвестициони трошкови, инвестиционе уштеде, смањење трошкова рада и потенцијални период повраћаја инвестиције. Поред оперативних критеријума битно је посматрати и економске како би се обезбедило да постоје финансијске користи од експлоатације система.

Када је реч о критеријумима квалитета разматрају се показатељи као што су стопа дефеката, потреба за дорадом производа, као и могућност смањења варијабилности изазване људским фактором.

Критеријуми усмерени на човека пре свега у обзир узимају ергономске аспекте радног места. Предност се даје оним радним станицама на којима се остварује највеће смањење физичког оптерећења оператера посматрано са аспекта учесталости понављајућих покрета, ризика од мишићно-коштаних поремећаја или изложености монотоним задацима.

Критеријуми флексибилности у обзир узимају могућност прилагођавања радне станице променама које ће настати у производном процесу након имплементације роботског решења. Вреднују се једноставност програмирања робота, прилагодљивост различитим производима и једноставност имплементације самог роботског решења без значајних измена производног система.

Без обзира на постојање више критеријума на основу којих се доноси одлука, у сваком појединачном случају постоје различити релативни значаји сваког од ових критеријума. Тежински коефицијенти се не одређују произвољно, већ на основу експертске процене стручњака који учествују у процесу доношења одлуке и самој имплементацији роботског решења. У избору радне станице на којој ће се вршити спровођење осталих корака *ARIM* модела учествовало је 7 експерата. Структура експертског панела приказана је у табели 26.

Табела 26 Структура експертског панела

Експерт	Област
Експерт 1	*Lean* менаџер
Експерт 2	Менаџер квалитета
Експерт 3	Процесни менаџер
Експерт 4	Супервизор смене 1
Експерт 5	Супервизор смене 2
Експерт 6	Производни инжењер
Експерт 7	Инжењер процесног планирања

Сваки од експерата попунио је упитник у коме је за сваки од пет дефинисаних критеријума расподелио укупно 100 поена у складу са њиховим значајем за избор радне станице погодне за имплементацију роботског решења. Сваки експерт је самостално формирао сопствену процену релативног значаја критеријума. Добијене вредности су нормализоване тако да важи:

$$\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$$

Након нормализације израчуната је средња вредност тежинских коефицијената за сваки критеријум, која је коришћена у даљој *WSM* анализи. Преглед тежинских коефицијената додељених од стране 7 експерата дат је у табели 27.

Табела 27 Тежински коефицијенти

Критеријум	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	Просек
Оперативни	30	25	20	30	25	25	20	25
Финансијски	20	20	20	20	20	20	20	20
Квалитет	15	25	20	15	20	20	25	20
Ергономија	25	15	20	25	15	20	20	20
Флексибилност	10	15	20	10	20	15	15	15

Критеријуми за вредновање потенцијалних радних станица за имплементацију роботског решења дефинисани су на основу КПИ-јева. Да би се применила *WSM*, КПИ-јеви су преведени на заједничку скалу (јер су изражени у различитим мерним јединицама и имају различите опсеге вредности). У складу са тим, применом *WSM* методе извршена је нормализација КПИ показатеља на јединствену скалу од 0 до100. Вредност 100 представља најповољнију, а вредност 0 најнеповољнију оцену у оквиру посматраног скупа алтернатива.

За критеријуме типа *benefit* (код којих већа вредност представља повољнији резултат) примењена је нормализација:

$$S_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} * 100$$

Где важи:

S_i– нормализована вредност *i*-тог показатеља
x_i– стварна вредност посматраног показатеља
x_{max}– максимална вредност показатеља у скупу алтернатива
x_{min}– минимална вредност показатеља у скупу алтернатива

За критеријуме типа *cost* (код којих нижа вредност представља повољнији резултат) примењена је нормализација:

$$S_i = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}} * 100$$

На овај начин, све нормализоване вредности имају исто значење. Односно, већа вредност представља повољнију алтернативу без обзира на природу посматраног показатеља. Нормализоване вредности (табела 28) појединачних КПИ показатеља агрегиране су у оквиру пет дефинисаних категорија, и те композитне оцене представљале су улазне вредности за *WSM* анализу и даље рангирање потенцијалних радних станица за имплементацију роботског решења.

Табела 28 Типови нормализације по категоријама критеријума

Категорија критеријума	КПИ	Јединица	Тип нормализације
Оперативни	*Throughput*	ком/сату	*Benefit*
Оперативни	Време циклуса	сек	*Cost*
Оперативни	Варијабилност процеса	%	*Cost*
Финансијски	Висина инвестиције	рсд	*Cost*
Финансијски	Годишње уштеде	рсд	*Benefit*
Квалитет	Стопа дефеката	%	*Cost*
Ергономија	*RULA* скор	-	*Cost*
Ергономија	Учесталост ручног руковања	циклуса/сату	*Cost*
Флексибилност	Адаптабилност производа	скор	*Benefit*
Флексибилност	Једноставност интеграције	скор	*Benefit*

Укупна оцена за потенцијалне радне станице за имплементацију роботског решења израчуната је на следећи начин:

$$Score = \sum_{i=1}^{n} w_i S_i$$

Где важи:

W_i - тежински коефицијент *i*-тог критеријума
S_i – оцена *i*-тог критеријума добијена експертским вредновањем
n – укупан број критеријума

У табели 29 приказан је обрачун укупне оцене за радну станицу А (мануелни трансфер).

Табела 29 Рачунање WSM оцене за радну станицу А

Критеријум	Тежина	Експертска оцена	Пондерисана вредност
Оперативни	0.25	85	21.25
Финансијски	0.20	72	14.40
Квалитет	0.20	87	17.40
Ергономија	0.20	45	9.00
Флексибилност	0.15	80	12.00
Укупна оцена	1.00	—	74.05

Поступак израчунавања може се поставити следећим изразом:

$Score_A$ = (0,25 * 85) + (0,20 * 72) + (0,20 * 87) + (0,20 * 45) + (0,15 * 80) =

= 21,25 + 14,40 + 17,40 + 9,00 + 12,00 =

= 74,05

Идентичан поступак коришћен је и за радну станицу Б (паковање). Коначни резултати *WSM* анализе дати су у табели 30.

Табела 30 Рачунање WSM оцене за радну станицу Б

КПИ	Тежина	Радна станица А	Оцена А	Радна станица Б	Оцена Б	Напомена
Оперативни	0,25	85	21,25	78	19,50	А – Већи проток мања варијабилност
Финансијски	0,2	72	14,40	70	14,00	А – Блага предност у трошковима
Квалитет	0,2	87	17,40	90	18,00	Б – Нижа стопа кварова
Ергономија	0,2	45	9,00	50	10,00	Б – Нешто боља ергономија
Флексибилност	0,15	80	12,00	60	9,00	А – Лакше прилагођавање
Укупна оцена	1		74,05		70,50	Пондерисан збир свих КПИ-јева

Из табеле 30 може се видети да је већу укупну оцену остварила радна станица А (74,05), у односу на радну станицу Б (70,50). Иако разлика у укупном оствареном резултату није велика може се приметити да је највећа предност радне станице А реализована у оквиру оперативних критеријума (85, док је Б 78). Разлика произилази пре свега из чињенице да је ручни трансфер материјала део процеса који има велики потенцијал за повећање пропусне моћи и стабилизације производног тока. Имплементација роботског решења на ову радну станицу допринела би смањењу варијабилности времена циклуса и континуираном протоку материјала кроз производни систем. Модел у овом кораку разматра имплементацију роботског решења у само једној радној станици у којој се врши мануелни трансфер материјала, са потенцијалним даљим разматрањем имплементације роботских решења и на идентичне овакве позиције у наставку производног процеса. Са друге стране, процес паковања налази се на самом крају производног ланца и самим тим мање утиче на рад претходних операција и укупни проток производње.

Разлика у реализованим оценама у оквиру економског критеријума је релативно мала (А – 72, Б – 70) што указује на слична инвестициона средства потребна у случају имплементације роботског решења у обе радне станице. Ипак, у случају радне станице А очекују се нешто веће оперативне уштеде (пре свега због елиминације ручног транспорта и бољег искоришћења ресурса).

Радна станица Б остварила је боље резултате у критеријумима који се односе на квалитет (90, у односу на А 87) и ергономију (50, у односу на А 45). Када је у питању критеријум квалитета сама разлика потиче из природе операције. Сам процес паковања утиче директно на квалитет финалног производа и имплементација роботског решења може обезбедити већу прецизност позиционирања и смањење варијабилности настале услед ручног рада. Када је у питању радна станица А, ефекти су нешто индиректнији и пре свега су везани за стабилизацију процеса, а не директно за унапређење квалитета финалног производа.

Иако обе операције подразумевају висок степен понављајућих покрета и континуирано мануелно руковање, процес паковања има нешто већи потенцијал за остваривање користи за оператера кроз аутоматизацију. Истовремено, према експертској процени, нижа оцена радне станице А указује да је њен релативни потенцијал нешто мањи у односу на радну станицу Б, али да свакако ергономски потенцијал постоји.

Највећа разлика између радне станице А и радне станице Б уочена је у оквиру критеријума флексибилности (80 А и 60 Б). Разлог овоме лежи у једноставној интеграцији роботског решења у процес ручног трансфера. Ради се о операцији *pick-and-place* са малом варијабилношћу и једноставним захтевима за позиционирање. Са друге стране, постоје већи захтеви када је реч о оријентацији производа и различитим амбалажама када је реч о процесу паковања.

Анализа резултата не показује доминацију ниједне од две потенцијалне радне станице за имплементацију роботског решења. Имајући у виду тежинске коефицијенте, већа укупна *WSM* оцена је за радну станицу А и на основу тога изабрана је за даљу анализу у оквиру *Robotic Startup Cycle.*

5.3.1 Анализа осетљивости резултата

Анализа осетљивости спроведена је како би се испитало у којој мери избор радне станице зависи од додељених тежинских коефицијената. У основном сценарију коришћене су тежине:

$$w = (0{,}25;\ 0{,}20;\ 0{,}20;\ 0{,}20;\ 0{,}15)$$

Добијени резултати су:

- *Score A* = 74,05
- *Score B* = 70,50

Дакле, радна станица А има предност од 3,55 поена.

У анализи осетљивости тежине сваког од критеријума мењане су за ± 20%. Након сваке промене преостале тежине пропорционално су прилагођене како би њихов укупан збир остао 1. У табели 31 дати су резултати анализе осетљивости. Резултати показују да је избор радне станице А робустан у односу на анализирани опсег промене тежина од ± 20%. Без обзира на промену од ± 20%, радна станица А је у сваком сценарију задржала прво место у рангирању. Додатно је испитана критична вредност тежинских коефицијената, односно вредност при којој би се укупне *WSM* оцене две кандидатске радне станице изједначиле и потенцијално довеле до промене рангирања. Резултати показују да би тежина критеријума који се односе на квалитет морала да порасте са почетних 0,20 на приближно 0,634, односно 63,4% укупне тежине, да би се две алтернативе изједначиле. Слично томе, за критеријум који се односе на ергономију критична тежина износи приближно 0,532, односно 53,2%.

У оба случаја ради се о значајно већим вредностима од оних добијених експертском проценом (0,20), што указује да умерена промена значаја ових критеријума не би довела до промене коначне одлуке. За оперативне, финансијске и критеријуме флексибилности, критична вредност се не налази у физички реалном интервалу тежина [0,1], што додатно потврђује стабилност избора радне станице А. Резултати критичне анализе стога указују да би за промену коначног рангирања било неопходно извршити веома значајну промену приоритета критеријума, која није у складу са експертски утврђеном структуром значаја критеријума.

Табела 31 Анализа осетљивости WSM методе

Сценарио	Оперативни	Финансијски	Квалитет	Ергономија	Флексибилност	Скор А	Скор Б	Боља оцена
Основни сценарио	0,250	0,200	0,200	0,200	0,150	74,05	70,50	**А**
Оперативни +20%	0,294	0,188	0,188	0,188	0,141	74,43	70,86	**А**
Оперативни −20%	0,206	0,212	0,212	0,212	0,159	73,68	70,14	**А**
Финансијски+ 20%	0,244	0,234	0,195	0,195	0,146	74,10	70,54	**А**
Финансијски− 20%	0,256	0,166	0,204	0,204	0,153	74,00	70,46	**А**
Квалитет +20%	0,244	0,195	0,234	0,195	0,146	73,94	70,59	**А**
Квалитет −20%	0,256	0,204	0,166	0,204	0,170	74,16	70,41	**А**
Ергономија +20%	0,244	0,195	0,195	0,234	0,131	73,87	70,61	**А**
Ергономија −20%	0,256	0,204	0,204	0,166	0,170	74,23	70,39	**А**
Флексибилност +20%	0,258	0,206	0,206	0,206	0,124	74,17	70,39	**А**
Флексибилност −20%	0,241	0,192	0,192	0,192	0,183	73,92	70,63	**А**

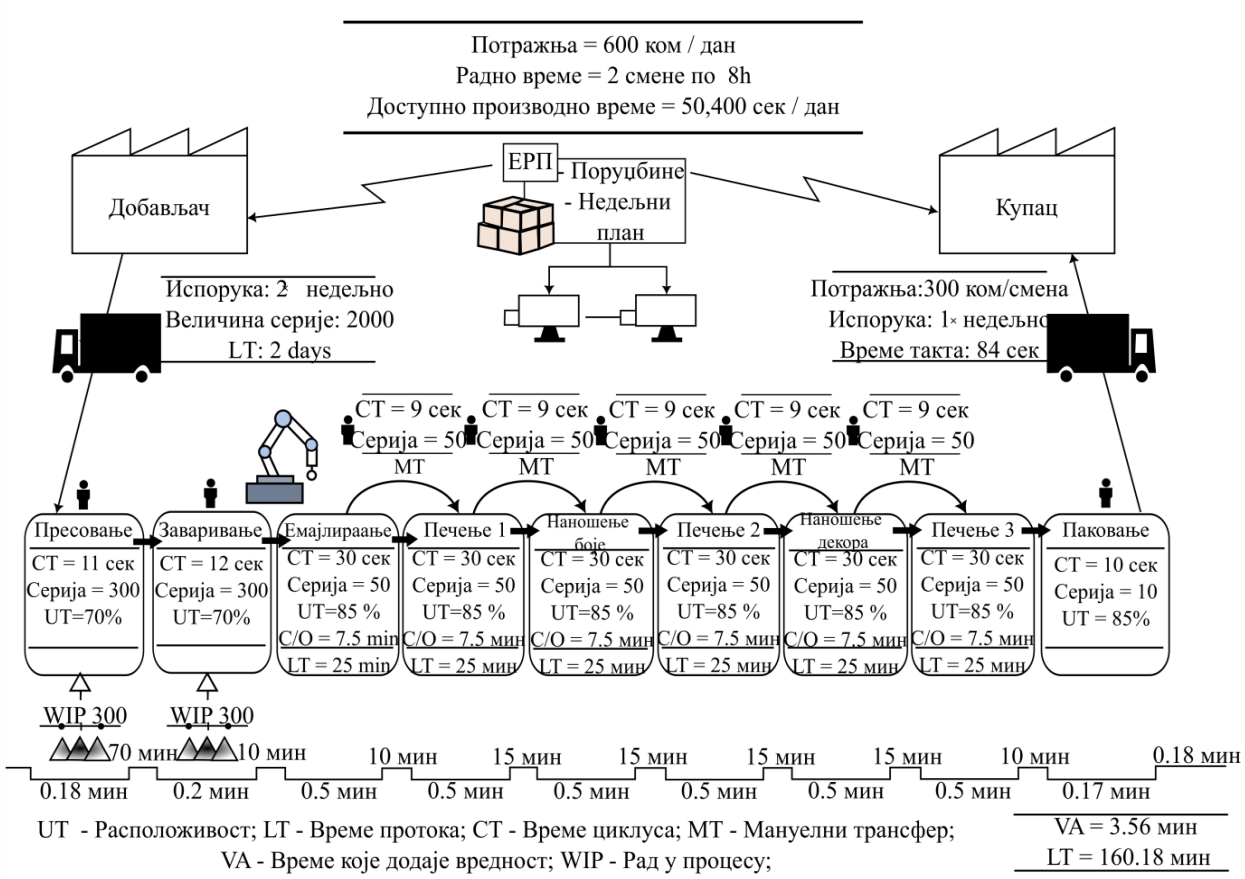
5.3.2 Будућа мапа тока вредности

Радна станица одабрана за потенцијалну имплементацију роботског решења у оквиру анализиране производне линије приказана је на слици 38.



Слика 38 Радна станица одабрана за имплементацију роботског решења

На слици 38 може се видети да оператер обавља понављајућу операцију стављања шерпи на транспортну траку. Оператер ручно рукује деловима. Како је и раније напоменуто, део производне линије организован је кроз механизоване елементе. На слици 39 приказана је будућа *VSM* у случају имплементације роботског решења на ову радну станицу.



Слика 39 Будућа мапа тока вредности

С обзиром да је планирана имплементација роботског решења на место мануелног трансфера материјала суштински се параметри самих производних операција као и њихова времена циклуса не мењају, већ се пре свега унапређење огледа у међуоперационом току материјала. Најзначајније промене приказане су у табели 32.

Табела 32 Најзначајније разлике између мапе тока вредности пре и после имплементације роботског решења

Параметар	Тренутно стање	Будуће стање	Промена	Унапређење у процентима
Време које додаје вредност	3,56 мин	3,56 мин	0	0 %
Време протока	260,18 мин	160,18 мин	−100 мин	38,43%
Време које не додаје вредност	256,62 мин	156,62 мин	−100 мин	38,97%
Удео времена које додаје вредност у укупном времену протока	1,37 %	2,22 %	+0,85 п.п.	≈62 %

Како је приказано на тренутној мапи тока вредности производне линије емајлирања посуђа, значајан део укупног времена протока производа повезан је са активностима које не додају вредност производу. Ове активности пре свега су у вези са међуоперационим транспортом, чекањем и задржавањем материјала између производних операција.

У тренутној мапи тока вредности изражена је диспропорција између времена неопходног за физичку трансформацију производа и времена које производ проводи у систему услед чекања и међуоперационих активности. Имплементација роботског

решења на радну станицу мануелног трансфера материјала као основни циљ има смањење времена чекања и унапређење континуитета тока материјала. С обзиром на смањење укупног *Lead Time*-а (38,43%) може се закључити да чак и без смањења времена саме операције имплементација роботског решења може да доведе до значајног побољшања перформанси целог система. Време које не додаје вредност такође се смањује са 256,62 на 156,62 минута чиме се види ефекат имплементације роботског решења у значајном смањењу губитака повезаних са међуоперационим транспортом и чекањем. Са друге стране, удео времена које додаје вредност повећава се са 1,37% на 2,22%. Иако је апсолутно време које додаје вредност непромењено, његов релативни удео у укупном времену протока повећава се за приближно 62%. Дакле, имплементација роботског решења доводи до систематског побољшања целокупног материјалног тока.

5.4 Robotic Startup Cycle

Након доношења одлуке о радној станици на којој треба бити имплементирано роботско решење спроводи се наредна фаза *ARIM* методе, *Robotic Startup Cycle (RSC).* Циљ ове фазе је испитивање роботског решења пре саме имплементације и инвестирања у роботско решење.

5.4.1 Флексибилни трансформативни систем - ФТС

Како би се идентификовало решење које представља најбољи компромис између техничке изводљивости, оперативних перформанси, квалитета, безбедности као и финансијске оправданости, развијен је ФТС. ФТС представља софтверски засновану експерименталну платформу за евалуацију роботских конфигурација. ФТС омогућава тестирање роботског решења без потребе за непосредном физичком имплементацијом. На овај начин смањује се ризик доношења одлуке о инвестицији на основу ограничених информација. У конкретном случају основна функција роботског система дефинисана је као *pick-and-place*. Операција подразумева детекцију производа, одређивање његове позиције, преузимање вакуумском хватаљком, трансфер и прецизно позиционирање на транспортну траку. Како би се добио предлог роботских решења за имплементацију на конкретном процесу дефинисана су ограничења која се налазе у табели 33.

Табела 33 Ограничења за одабир роботског решења

Ограничење	Ограничење
Носивост	7-10 кг
Цена	3,5 – 4,5 милиона рсд
Потрошња електричне енергије	0-3 kW
Домет	1300 – 1503 мм
Поновљивост	±0.05 – ±0.06 мм
Број степени слободе	6

На основу карактеристика процеса и захтева дефинисаних за роботску апликацију, идентификована су два најподударнија роботска решења. Ова два роботска решења су технички изводљива. Постоји још роботских решења која су адекватна за конкретан процес, али су два решења која се највише подударају са захтевима узета за даљу анализу. Роботска решења која су идентификована као решења са највећим подударањем у оквиру дефинисаних захтева приказани су у табели 34.

Табела 34 Идентификована роботска решења у оквиру дефинисаних захтева

	Сценарио А	Сценарио Б
Робот	*Mitsubishi RV-7FLL, Q series*	*UR10e, Universal Robots*
Носивост	7 кг	10 кг
Број степени слободе	6	6
Домет	1503 мм	1300 мм
PLC / контролер	*Mitsubishi Q series*са роботском управљачком картицом	*Universal Robots* контролер са интегрисаним роботским управљањем
HMI	*GOT 2000 GT2715*	*UR Teach Pendant*
Камера	*SICK Inspector83x + PLOC2D 5.2*	*Cognex In-Sight 7000 + In-Sight Explorer 6.5.0*
Хватаљка	Вакуумска	Вакуумска
Безбедност	Стандардни колаборативни сензори	Интегрисани колаборативни сензори+ опционо екстерни ласерски скенер
Просторна адаптација	Компактна конфигурација	Већа површина

Сценарио А обухвата прво роботско решење засновано на *Mitsubishi RV-7FLL* роботу са носивошћу од 7 килограма и радним досегом од 1503 милиметара. Систем укључује *Mitsubishi Q-series PLC* са одговарајућом управљачком картицом за роботско управљање, *GOT 2000 GT2715* интерфејс, *SICK Inspector83x* камеру са *PLOC2D 5.2* софтвером за детекцију и локализацију производа, као и вакуумску хватаљку. Конфигурација је пројектована као компактно решење, што је значајно с обзиром на просторна ограничења радног места.

Сценарио Б обухвата друго роботско решење засновано на *Universal Robots UR10e* роботу са носивошћу од 10 килограма и радним досегом од 1300 милиметара. Конфигурација укључује одговарајући роботски контролер са *teach pendant* интерфејсом, *Cognex In-Sight 7000* камеру са *In-Sight Explorer 6.5.0* софтвером за детекцију и локализацију производа и вакуумску хватаљку. Само роботско решење има већу носивост што омогућава већу флексибилност.

Оба наведена сценарија задовољавају техничке захтеве процеса, а инвестициона одлука ће се даље базирати на диференцираним критеријумима. ФТС представља почетну тачку за експериментисање са алтернативним конфигурацијама, а коначна одлука доноси се након евалуације кључних индикатора перформанси. „Направи-Измери-Научи“ операционализује се кроз формирање потенцијалног решења, мерење очекиваних перформанси и доношења одлуке о даљем развоју или промени конфигурације. У складу са тим, ова два сценарија, А и Б, даље су евалуиране применом развијеног софтверског алата за подршку одлучивању заснованог на КПИ-јевима.

Циљ евалуације јесте утврђивање који од сценарија обезбеђује најбоље укупне резултате. Укупни резултати пореде се са унапред дефинисаним критеријумима и циљевима који се постављају унутар самог производног система.

5.4.2 Евалуација

Након утврђивања потенцијалних алтернативних роботских конфигурација за имплементацију на радној станици за мануелни трансфер, спроведена је њихова евалуација. Евалуација је спроведена за три различите конфигурације производног процеса:

- Тренутни, мануелни начин рада,

- Сценарио А (*Mitsubishi RV-7FLL*),
- Сценарио Б (*Universal Robots UR10e*).

Евалуацијом мануелног начина рада и дефинисане две конфигурације производног процеса омогућено је утврђивање постојања унапређења у случају имплементације роботског решења у односу на мануелни рад, као и утврђивање које од предложена два роботска решења даје боље резултате.

Дисконтна стопа одређена је на основу просечног пондерисаног трошка капитала (енг. *Weighted Average Cost of Capital – WACC).* Дисконтна стопа у складу са тим израчуната је по формули:

$$WACC = \frac{E}{D+E} * R_e + \frac{D}{D+E} * R_d(1-T)$$

Где важи:

E – Тржишна вредност капитала

D – Тржишна вредност дуга

R_e – Трошак капитала

R_d – Трошак дуга

T – Стопа пореза на добит

Набавна цена роботских система преузета је из понуда добављача и дефинисане цене обухватају и трошак грипера, и додатне опреме. Трошкови рада, производни капацитет, продајна цена, плата оператера, број дефеката, број дана боловања на годишњем нивоу за конкретно радно место, као и други подаци везани за сам производни систем добијени су у компанији. За потребе евалуације коришћени су стварни подаци из компаније, док су у дисертацији приказани изведени резултати који онемогућавају идентификацију поверљивих пословних података.

Како је раније напоменуто, евалуација обухвата четири групе кључних индикатора перформанси, и то, финансијске, оперативне, безбедност и квалитет. У табели 35 приказани су подаци за мануелни трансфер и за оба сценарија. Приказани подаци односе се само на кључне индикаторе перформанси да би се утврдило потенцијално унапређење у случају имплементације роботског решења. У наставку дате су детаљне анализе кључних индикатора перформанси.

Табела 35 Добијени КПИ за мануелни трансфер, Сценарио А и Сценарио Б

КПИ	Мануелно	Сценарио А	Сценарио Б
Нето добит	11.534.870 рсд	13.511.870 рсд	13.509.482 рсд
Тачка рентабилности	5.408 ком	6.526 ком	6.531ком
Укупна ефикасност опреме	0.68	0.86	0.82
Стопа дефеката	2%	1%	1%
Стопа одсуствовања због боловања	4%	≈ 0	≈ 0
Трошак рада по радном стану	682 рсд	568 рсд	568 рсд
Стопа флуктуације запослених на конкретном радном месту	2.5%	-	-
Годишњи трошак боловања	24.032 рсд	5.850 рсд	5.850 рсд
Годишњи трошак флуктуације запослених	461.636 рсд	-	-
Стопа непоштовања безбедносних захтева	1%	≈ 0	≈ 0
Време рада	3484 *h*	4224 *h*	4224 *h*

У финансијском сегменту, Сценарио А остварује нето добит од 13.511.870 рсд, у односу на 13.509.482 рсд колико остварује Сценарио Б. У поређењу са случајем мануелног трансфера (11.534.870 рсд), оба сценарија показују значајно унапређење. Виши нето профит указује да Сценарио А у односу на Сценарио Б при овим претпоставкама остварује нешто повољнији резултат, међутим, овај показатељ није сам по себи довољан за избор оптималне конфигурације, јер сама разлика од 2.388 рсд је занемарљива.

Тачка рентабилности показује минималан број произведених јединица који је неопходан како би се покрили фиксни и варијабилни трошкови. Тачка рентабилности је тачка у којој је пословни резултат једнак нули. Нижа тачка рентабилности указује на повољнији резултат, јер је потребан мањи број производа како би компанија почела да остварује позитивне резултате. У случају Сценарија А тачка рентабилности је нешто нижа (6.526 комада) у односу на Сценарио Б (6.531 комада). Тачка рентабилности код мануелног трансфера је нешто нижа у односу на оба сценарија (5.250 комада). Ово је последица већег учешћа фиксних трошкова у случају имплементације роботског решења. Иако имплементација роботског решења доприноси смањењу трошкова рада по јединици производа, потребан је већи обим производње како би се достигла тачка рентабилности. С обзиром на могућност унапређења времена производње потребног за једну јединицу производа, односно у конкретном случају смањења активности које не додају вредност, тачка рентабилности се у неким случајевима може достићи раније у случају имплементације роботског решења него у случају мануелног трансфера иако је сам обим потребних производа већи. Такође, посебно је важно овај показатељ посматрати заједно са другим показатељима, као што су нето садашња вредност и период повраћаја инвестиције, како би се стекао увид у дугорочну исплативост имплементације роботског решења.

Када је реч о укупној ефикасности опреме у случају Сценарија А је 0,86 док у случају Сценарија Б износи 0,82. Виша вредност свакако указује на већу расположивост производног потенцијала који се претвара у квалитетан производ. Мада, сама четири процентна поена такође не представљају велику разлику, они указују на нешто ефикасније коришћење опреме у случају Сценарија А. Са аспекта стопе дефеката и стопе одсуствовања због боловања, као и када је реч о трошку рада по радном сату, обе конфигурације су практично изједначене. Значајно смањење трошка рада по сату у случају имплементације било које од две разматране конфигурације роботског решења указује на смањење директне зависности роботизованог система од људског рада, а самим тим и оперативних трошкова.

Годишња флуктуација запослених на конкретном радном месту од 2,5 у случају мануелног трансфера указује на постојање флуктуације радне снаге која доводи и до додатних трошкова селекције, обуке, увођења нових радника у процес и самим тим губитка на продуктивности. Код роботизованих сценарија овај индикатор је ирелевантан, јер је зависност процеса од стабилности расположиве радне снаге сведена на минимум. Сличан случај је и са годишњим трошком флуктуације радника која у случају мануелног трансфера износи 461.636 рсд, док је у случају имплементације роботског решења ова вредност занемарљива.

Осим што утиче на смањење директних трошкова рада, имплементација роботског решења доводи и до смањења индиректних трошкова повезаних са одсуством радне снаге, као што је годишњи трошак боловања. У конкретном случају, трошак боловања на годишњем нивоу у случају мануелног трансфера износи 24.032 рсд, док у случају имплементације роботског решења, без обзира на конфигурацију, износи 5.850

рсд. Стопа непоштовања безбедносних захтева представља учесталост случајева у којима производни процес или радно место не испуњава дефинисане захтеве безбедности. Вредност од 1% код мануелног трансфера, насупрот приближно 0% код роботизованих сценарија, указује на потенцијално смањење изложености радника ризичним операцијама. Време рада у случају сценарија А и Б је 4.224*h*, док мануелно време рада износи 3.484*h*. Највећа разлика у овом времену проистиче из чињенице да у случају имплементације роботског решења не постоји потреба за паузама у току радног времена. Самим тим, повећава се расположивост производног система и могућност остваривања већег производног капацитета.

Резултати указују на то да обе роботске конфигурације остварују боље резултате у односу на постојећи, мануелни начин рада. Међутим, када се посматрају укупне перформансе могу се уочити значајне разлике.

Резултати евалуације КПИ за две алтернативне роботске конфигурације приказани су у табели 36.

Табела 36 КПИ за две алтернативне роботске конфигурације

КПИ	Сценарио А	Сценарио Б
Нето садашња вредност (проширени ефекти)	4,11 мил рсд	2,24 мил рсд
Нето садашња вредност (директни ефекти)	2,93 мил рсд	1,31 мил рсд
Повратна улагање	33,80%	26,50%
Период повраћаја инвестиције	2,96 године	3,78 године
Трошак инсталације по радном сату робота	2,34 рсд	2,34 рсд
Трошак обуке радника по произведеној јединици	0,24 рсд	0,23 рсд
Трошак одржавања по радном сату робота	20 рсд	45 рсд
Трошак рада по радном сату робота	568 рсд	568 рсд
Ослобођени радни капацитет	3.256 *h*/ год	3.124 *h*/ год
Индекс инвестиционе ефикасности	0,231	0,189

Нето садашња вредност (проширени ефекти) у случају сценарија А износи 4,11 милиона динара, што указује на већу вредност инвестиције у овом тренутку у односу на инвестицију у случају Сценарија Б. Ова разлика додатно добија на значају с обзиром да је у случају Сценарија А потребан нижи капитални издатак. Сама позитивна нето садашња вредност указује на стварање вредности изнад уложеног капитала при дефинисаној дисконтној стопи. Али може се рећи да већу апсолутну економску вредност за инвеститора има Сценарио А.

Повратна улагање приказује принос на уложена средства и изражава економску корист која се остварује у односу на инвестицију. У случају Сценарија А износи 33,80%, а у случају Сценарија Б 26,50%. Виши повратна улагање у случају Сценарија А указује на ефикасније коришћење уложеног капитала. Дакле, постоји повољнији однос остварене користи и висине инвестиција у корист Сценарија А.

Период повраћаја инвестиције за Сценарио А је 2,96 година, док је за Сценарио Б 3,78 године. Дакле, и у случају периода повраћаја инвестиције Сценарио А показује боље резултате јер омогућава бржи повраћај.

Трошак обуке радника по произведеној јединици је у оквиру занемарљивих разлика. Још један параметар у коме не постоји разлика је трошак рада по радном сату робота који износи 568 рсд у оба сценарија.

Трошак одржавања по радном сату робота указује на то колико одржавање опреме кошта за сваки сат његовог рада, и Сценарио А има нешто повољније трошкове одржавања (20 рсд) у односу на Сценарио Б (45 рсд).

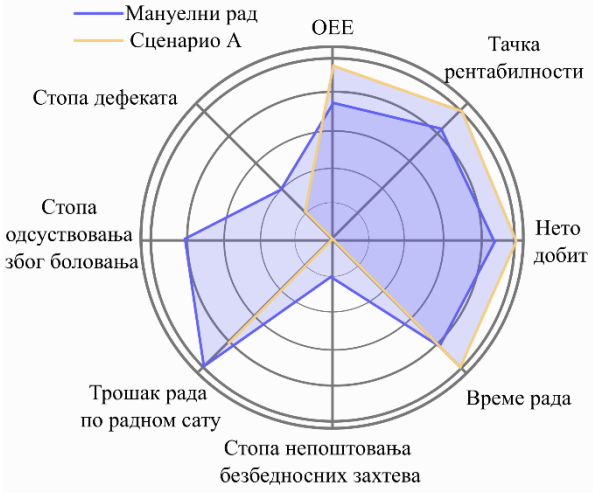
Показатељ ослобођени радни капацитет указује на број сати који се ослобађају за обављање других активности након имплементације роботског решења. Сценарио А остварује већи ослобођени радни капацитет од 3.256 *h* на годишњем нивоу, док у случају Сценарија Б та вредност износи 3.124 *h*. Овај показатељ указује на то да се економски ефекат роботизације не огледа само у смањењу трошкова рада, већ и у могућности прерасподеле оператера на друге задатке, на којима могу да обављају активности које додају вредност производу са аспекта купца.

На крају, индекс инвестиционе ефикасности указује да је и према ово критеријуму фаворит Сценарио А у односу на Сценарио Б, са нешто вишим резултатом од 0,231, наспрам 0,189.

Гледано свеукупно, Сценарио А има израженију економску предност. Са друге стране, може се приметити да Сценарио Б доминира у одређеним оперативним критеријумима. Ови ефекти нису довољни да надоместе већи инвестициони издатак и слабије резултате кључних финансијских показатеља. Оперативно посматрано, разлике између ове две конфигурације су доста мале, док је у погледу финансијских перформанси Сценарио А значајно надмашио Сценарио Б. Сходно томе, Сценарио А представља примарну опцију у циљу максимизације економске вредности инвестиције, с обзиром на сличне остале вредности показатеља. На основу добијених резултата кључних индикатора перформанси може се рећи да сценарио А превазилази Сценарио Б у већини посматраних параметара. Међутим, како сама вредност кључних индикатора перформанси није довољна за доношење коначне одлуке због неизвесности која је инхерентна *ex ante* проценама, спроведена је анализа осетљивости кључних финансијских параметара. На слици 40 приказан је однос КПИ-јева у случају сСценарија А и Б, а на слици 41 однос КПИ-јева у случају мануелног и одабраног роботизованог сценарија (Сценарио А).



Слика 40 Сценарио А vs Сценарио Б



Слика 41 Сценарио А vs мануелни трансфер

Анализа осетљивости спроведена је у циљу испитивања робусности економских резултата у условима промене оних параметара који могу значајно утицати на оправданост инвестиције.

5.4.3 Анализа осетљивости

Сваки од параметара који улази у калкулацију појединачног КПИ који је посматран у анализи осетљивости анализиран је на промене од опционо ± 20%, ± 10% или ± 30%. У табели 37 приказани су резултати за нето садашњу вредност (проширени ефекти) ± 20 %.

Из табеле 37 можемо видети да је економска оправданост аутоматизације изразито одређена оперативним параметрима, док су класични инвестициони параметри од секундарног значаја. Највећу осетљивост овај КПИ показује у односу на трајање мануелне смене, број радних дана месечно код роботског процеса, трајање роботске смене и број смена робота. Ови параметри указују на веома високу осетљивост. Интензитет коришћења производног капацитета и расположиво радно време представљају кључне детерминанте економске вредности аутоматизације у овом случају. Највећа корист остварује се уколико се расположиви аутоматизовани капацитети континуирано користе. Висока осетљивост постоји и код времена циклуса, а сличан образац присутан је и код броја радних дана и смена мануелног процеса. Дакле, неопходно је посматрати и мануелни и аутоматизовани процес у контексту стварног режима рада, а не на основу номиналног капацитета опреме.

Следећи значајан фактор јесте цена производа. Иако је утицај цене изузетно велики, мањи утицај у односу на оперативне параметре указује на то да се инвестициона активност пре свега заснива на оперативном унапређењу, а не на претпоставци о високој цени. Сличан образац односи се и на трошак производње по произведеној јединици, што указује на сличан значај јединичних трошкова у процени ефеката аутоматизације. Ово је очекивано, јер промена продајне цене, као и трошка производње по јединици производа, директно утиче на новчане токове. Насупрот томе, цена робота има релативно ограничен утицај на нето садашњу вредност (проширени ефекти). Мада је цена робота највећи елемент разматране инвестиције, резултати указују на то да њена промена не утиче значајно на укупну економску вредност у односу на промене у радном режиму и продуктивности. Ово је посебно значајно приликом доношења инвестиционе одлуке, јер указује на то да оптимизација коришћења робота може имати већи економски ефекат од саме минимизације набавне цене опреме.

Табела 37 Анализа осетљивости нето садашње вредност (проширени ефекти)

УЛАЗНИ ПАРАМЕТРИ	ОСНОВА	−20%	+20%	ПРОМЕНА	УДЕО
Време циклуса (робот)	8.43	20.12 M РСД	-6.56 M РСД	26.69 M РСД	649 %
Трајање смене (мануелно)	480	16.92 M РСД	-8.70 M РСД	25.62 M РСД	623 %
Број радних дана месечно (робот)	22	-8.59 M РСД	16.78 M РСД	25.37 M РСД	617 %
Трајање смене (робот)	480	-8.51 M РСД	16.73 M РСД	25.24 M РСД	614 %
Број смена (робот)	2	-8.44 M РСД	16.67 M РСД	25.11 M РСД	611 %
Време циклуса (мануелно)	8.43	-9.23 M РСД	13.01 M РСД	22.24 M РСД	541 %
Број радних дана месечно (мануелно)	22	14.89 M РСД	-6.63 M РСД	21.52 M РСД	523 %
Број смена (мануелно)	2	14.70 M РСД	-6.48 M РСД	21.19 M РСД	515 %
Цена производа	1,350	-2.04 M РСД	10.26 M РСД	12.30 M РСД	299 %
Трошак производње по јединици	870	7.96 M РСД	260,638 РСД	7.70 M РСД	187 %
Цена робота	4,500,000	4.99 M РСД	3.23 M РСД	1.76 M РСД	43 %
Каматна стопа на кредит	0.06	4.61 M РСД	3.64 M РСД	971,428 РСД	24 %
Учешће кредитног финансирања	0.75	4.61 M РСД	3.64 M РСД	971,428 РСД	24 %
Број дефектних производа месечно (мануелно)	30	3.68 M РСД	4.54 M РСД	863,098 РСД	21 %
Број дефектних производа месечно (робот)	20	4.40 M РСД	3.82 M РСД	575,398 РСД	14 %
Додатна опрема	1,100,000	4.40 M РСД	3.83 M РСД	570,933 РСД	14 %
Очекивани годишњи раст продаје	0.05	3.92 M РСД	4.30 M РСД	381,399 РСД	9 %
Потрошња електричне енергије	2.8	4.30 M РСД	3.92 M РСД	378,075 РСД	9 %
Цена електричне енергије	18	4.30 M РСД	3.92 M РСД	378,075 РСД	9 %
Трошак сопственог капитала	0.12	4.29 M РСД	3.93 M РСД	363,395 РСД	9 %
Стопа амортизације	0.14	4.27 M РСД	3.99 M РСД	281,572 РСД	7 %
Порез на добит	0.15	4.01 M РСД	4.21 M РСД	203,075 РСД	5 %
Број радника у процесу	1	4.03 M РСД	4.19 M РСД	161,447 РСД	4 %
Бруто зарада	100,000	4.03 M РСД	4.19 M РСД	161,447 РСД	4 %
Трошак одржавања месечно	7,000	4.19 M РСД	4.04 M РСД	149,177 РСД	4 %
Цена грипера	250,000	4.18 M РСД	4.05 M РСД	129,757 РСД	3 %
Број оператера робота	1	4.18 M РСД	4.05 M РСД	129,158 РСД	3 %
Зарада оператера робота	100,000	4.18 M РСД	4.05 M РСД	129,158 РСД	3 %
Залиха пре процеса (мануелно)	1,000	4.07 M РСД	4.15 M РСД	77,253 РСД	2 %
Залиха пре процеса (робот)	500	4.13 M РСД	4.09 M РСД	38,626 РСД	1 %
Стопа трошкова држања залиха	0.05	4.09 M РСД	4.13 M РСД	38,626 РСД	1 %
Број дана боловања годишње	10	4.09 M РСД	4.13 M РСД	32,289 РСД	1 %
Смањење повреда услед аутоматизације	0.2	4.09 M РСД	4.13 M РСД	32,289 РСД	1 %

Финансијски параметри, као што су каматна стопа на кредит и учешће кредитног финансирања, имају осетљивост од 24%, док фактори повезани са квалитетом, додатном опремом и растом продаје имају још мањи утицај. Ово указује на то да унапређење

квалитета доприноси економској вредности аутоматизације, али у конкретном случају тај ефекат није доминантан у односу на посматране ефекте продуктивности и искоришћења капацитета. Потрошња и цена електричне енергије, као и цена сопственог капитала, имају ниску осетљивост, као и стопа амортизације, пореска стопа, зараде запослених, трошак одржавања и трошак додатне опреме. Најмању осетљивост имају параметри који су у вези са залихама, боловањем и смањењем повреда, што значи да они имају веома мали утицај на инвестициони ризик.

У анализи осетљивости од изузетног значаја је распон резултата нето садашње вредности (проширени ефекти). Најосетљивије варијабле утичу на сценарио у изузетно великом опсегу. На пример, код трајања мануелне смене нето садашња вредност (проширени ефекти) креће се од −8,70 милиона рсд до 16,92 милиона рсд. То показује да инвестиција може имати значајно различите резултате у односу на базне претпоставке уколико се кључни оперативни параметри промене. Дакле, највећи ризик не проистиче из инвестиционе цене, већ из нивоа искоришћења роботског система. Са друге стране, промена месечних трошкова одржавања или цене хватаљке утиче на нето садашњу вредност мање од 150 хиљада рсд у укупном распону, што указује на то да оптимизација ових ставки може допринети унапређењу резултата, али свакако није пресудна за инвестициону одлуку.

Свеукупно, ово указује на то да треба напустити приступ процене инвестиције првенствено кроз почетни капитални издатак и посматрати систем чија вредност зависи од интеракције капитала, времена рада, продуктивности, квалитета и трошкова. Дакле, приоритети су обезбеђивање довољног обима производње, високе расположивости робота и адекватног броја радних сати и смена. Управо ове варијабле имају највећи потенцијал да повећају или угрозе економску исплативост. У табели 38 налази се анализа осетљивости периода повраћаја инвестиције.

Табела 38 Анализа осетљивости – Период повраћаја инвестиције

УЛАЗНИ ПАРАМЕТАР	ОСНОВА	−20%	+20%	ПРОМЕНА	УДЕО
Цена производа	1,350	9.88 год	1.74 год	8.14 год	275 %
Трошак производње по произведеној јединици	870	2.05 год	5.29 год	3.24 год	109 %
Цена робота	4,500,000	2.45 год	3.49 год	1.05 год	35 %
Број дефектних производа месечно (мануелно)	30	3.11 год	2.82 год	0.29 год	10 %
Трошак додатне опреме	1,100,000	2.83 год	3.09 год	0.26 год	9 %
Број дефектних производа месечно (робот)	20	2.87 год	3.06 год	0.19 год	7 %
Потрошња електричне енергије	2.8	2.90 год	3.02 год	0.13 год	4 %
Цена електричне енергије	18	2.90 год	3.02 год	0.13 год	4 %
Цена грипера	250,000	2.93 год	2.99 год	0.06 год	2 %
Месечни трошак одржавања	7,000	2.93 год	2.98 год	0.05 год	2 %

Анализа осетљивости за период повраћаја инвестиције указује на то да је овај КПИ пре свега одређен тржишним и производним економским параметрима, док оперативни и технички трошкови значајно мање утичу. Цена производа доминантно утиче на период повраћаја инвестиције и то за ±20% чак у распону од 1,74 до 9,88 година. С обзиром на то, продајна цена представља кључни тржишни ризик за инвестицију у роботско решење.

Уз продајну цену, следећи најзначајнији фактор који утиче на период повраћаја инвестиције је трошак производње по произведеној јединици, чија промена од ±20% утиче на период повраћаја инвестиције тако да се креће у распону од 2,05 до 5,29 година. Дакле, тржишна цена производа и трошак производње по произведеној јединици имају кључну улогу у периоду у коме ће инвестиција бити исплаћена.

Промена цене робота заузима треће место у анализи осетљивости када је у питању период повраћаја инвестиције. Иако је цена робота директно повезана са капиталним издатком, њен утицај је знатно мањи у односу на тржишну цену и трошак производње по произведеној јединици. Ово је значајно, јер указује на то да економска оправданост аутоматизације није доминантно одређена минимизацијом набавне цене робота, већ способношћу да генерише довољан ниво прихода и уштеда трошкова. Смањење броја дефектних производа у мануелном процесу може утицати на скраћивање периода повраћаја инвестиције, али овај ефекат у посматраном моделу није доминантан. Слично томе, промена цене додатне опреме нема пресудан утицај на укупну динамику повраћаја инвестиције. Повећање квалитета такође има позитиван, али релативно ограничен утицај на период повраћаја инвестиције. У контексту проширене нето садашње вредности то је значајно јер указује да сам квалитет има значајнији утицај на економску оправданост, али није главни покретач брзине повраћаја почетне инвестиције. Технички и енергетски параметри имају веома низак утицај, као и цена грипера и трошкови одржавања. Промена месечног трошка одржавања мења период повраћаја инвестиције за само 0,05 година, док промена цене грипера генерише промену од 0,06 година. Ово показује да, у оквиру анализираних претпоставки, текући технички трошкови представљају релативно мали извор ризика у односу на приходну страну и јединичне производне трошкове.

Прегледани резултати указују на то да маржа по произведеној јединици има највећи утицај на период повраћаја инвестиције. Посебно значајно јесте да су доминантни економски односи између прихода и јединичних трошкова, у односу на проширену нето садашњу вредност, где су доминантни били оперативни параметри коришћења капацитета. У конкретном случају, посматрани параметри не мере исту димензију инвестиционе атрактивности. Проширена нето садашња вредност посебно је осетљива на способност инвестиције да генерише укупну дугорочну економску вредност, док је период повраћаја инвестиције посебно осетљив на брзину којом се почетна инвестиција покрива кроз оперативни новчани ток. Табела 39 показује анализу осетљивости када је у питању нето садашња вредност (директни ефекти).

Анализа осетљивости нето садашње вредности (директни ефекти) указује на осетљивост у односу на оперативне параметре који одређују производни капацитет и продуктивност роботизованог процеса. Највећу осетљивост овај КПИ показује у односу на време циклуса, где промене од ±20% доводе до распона од чак 26,69 милиона рсд. Ово указује да је ефикасност роботизованог процеса кључна детерминанта економске вредности инвестиције. Скраћење времена циклуса значајно повећава производни капацитет и генерисане новчане токове. Супротно, његово повећање може довести до негативне нето садашње вредности (директни ефекти).

Радни режим производног система, односно број смена, радних дана и трајање смене утичу највише на вредност инвестиције. Параметри роботизованог процеса су међу најосетљивијим, што указује на то да сама инсталација роботског решења не гарантује економску корист, већ је неопходно обезбедити довољан број радних сати, смена и дана како би се инвестициони капацитет искористио адекватно.

Табела 39 Анализа осетљивости – Нето садашња вредност (директни ефекти)

УЛАЗНИ ПАРАМЕТАР	ОСНОВА	−20%	+20%	ПРОМЕНА	УЧЕШЋЕ
Време циклуса (робот)	8.43	18.94 M РСД	-7.75 M РСД	26.69 M РСД	912 %
Трајање смене (мануелно)	480	15.74 M РСД	-9.88 M РСД	25.62 M РСД	875 %
Број смена (робот)	2	-9.69 M РСД	15.55 M РСД	25.24 M РСД	862 %
Број радних дана месечно (робот)	22	-9.69 M РСД	15.55 M РСД	25.24 M РСД	862 %
Трајање смене (робот)	480	-9.69 M РСД	15.55 M РСД	25.24 M РСД	862 %
Време циклуса (мануелно)	8.43	-10.42 M РСД	11.82 M РСД	22.24 M РСД	760 %
Број радних дана месечно (мануелно)	22	13.60 M РСД	-7.75 M РСД	21.35 M РСД	729 %
Број смена (мануелно)	2	13.60 M РСД	-7.75 M РСД	21.35 M РСД	729 %
Цена производа	1,350	-3.22 M РСД	9.07 M РСД	12.30 M РСД	420 %
Трошак производње по произведеној јединици	870	6.80 M РСД	-942,814 РСД	7.74 M РСД	264 %
Цена робота	4,500,000	4.03 M РСД	1.83 M РСД	2.20 M РСД	75 %
Број дефектних производа месечно (мануелно)	30	2.49 M РСД	3.36 M РСД	863,098 РСД	29 %
Број дефектних производа месечно (робот)	20	3.21 M РСД	2.64 M РСД	575,398 РСД	20 %
Трошак додатне опреме	1,100,000	3.20 M РСД	2.66 M РСД	537,676 РСД	18 %
Каматна стопа на кредит	0.06	3.15 M РСД	2.71 M РСД	434,094 РСД	15 %
Удео финансирања кредитом	0.75	3.15 M РСД	2.71 M РСД	434,094 РСД	15 %
Потрошња електричне енергије	2.8	3.12 M РСД	2.74 M РСД	378,075 РСД	13 %
Цена електричне енергије	18	3.12 M РСД	2.74 M РСД	378,075 РСД	13 %
Очекивани годишњи раст продаје	0.05	2.76 M РСД	3.09 M РСД	326,493 РСД	11 %
Цена сопственог капитала	0.12	3.07 M РСД	2.78 M РСД	289,344 РСД	10 %
Месечни трошак одржавања	7,000	3.00 M РСД	2.85 M РСД	149,177 РСД	5 %
Цена грипера	250,000	2.99 M РСД	2.87 M РСД	122,199 РСД	4 %

Слично важи и за карактеристике мануелног процеса. Што је мануелни процес спорији, корист од аутоматизације је већа. И у случају нето садашње вредности (директни ефекти) продајна цена и трошак производње по произведеној јединици имају значајан утицај. Кључне маргиналне економске детерминанте представљају управо ова два параметра, док оперативни параметри одређују обим на коме се та маржа реализује.

Цена робота има знатно мању, али и даље релевантну осетљивост од 75%. Набавна цена робота није најзначајнији фактор економске оправданости, иако већа инвестиција директно смањује нето садашњу вредност. Ефекат цене робота мањи је од ефекта који на вредност инвестиције имају оперативна ефикасност и степен искоришћења система.

Параметри повезани са квалитетом доприносе економској вредности аутоматизације, али нису главни покретач нето садашње вредности (директни ефекти) у посматраном случају. Трошак додатне опреме има осетљивост од 18%, док каматна стопа на кредит и удео финансирања кредитом имају по 15%.

Енергетски параметри имају умерен, али не доминантан утицај. Ово је значајно јер при актуелним претпоставкама о потрошњи и цени електричне енергије, трошкови енергије нису кључни ризик за инвестицију. Слично томе, очекивани годишњи раст продаје и цена сопственог капитала имају релативно низак утицај. Најмању осетљивост показују месечни трошак одржавања и цена грипера.

Када је реч о анализи осетљивости нето добити, може се рећи да је профитабилност роботизованог процеса пре свега условљена оперативним параметрима који одређују производни капацитет и интензитет коришћења система. Време циклуса показује највећу осетљивост и утиче на нето добит у распону од -427 хиљада до 5,58 милиона рсд. Ово индицира да је управо продуктивност један од кључних фактора профитабилности приликом имплементације роботског решења.

Трајање смене и у случају нето добити има значајан утицај, што указује на то да је релативна продуктивност мануелног процеса веома значајна за коначан профитабилни ефекат роботизације. Слична ситуација је и са бројем радних сати, смена и дана. Време циклуса са друге стране има нешто нижи, али и даље изузетно значајан утицај, што указује на то да економска корист роботизације није формирана на основу перформанси робота, већ и у односу на продуктивност и организацију постојећег мануелног процеса.

Сличан утицај имају и број смена и радних дана у случају мануелног трансфера. Већи јаз између мануелног и роботизованог процеса са аспекта продуктивности осигурава и већи утицај роботизације на нето добит. И у случају нето добити, продајна цена и цена коштања производа имају одређени утицај, и ове две варијабле представљају главне економске детерминанте профитабилности. Међутим, без обзира на свој значај, и даље имају мањи утицај од кључних оперативних параметара.

Коначно, у табели 40 приказана је анализа осетљивости нето добити.

Табела 40 Анализа осетљивости – Нето добит

УЛАЗНИ ПАРАМЕТАР	ОСНОВА	−20%	+20%	ПРОМЕНА	УДЕО
Време циклуса (робот)	8.43	5.58 M РСД	-427,390 РСД	6.01 M РСД	304 %
Трајање смене (мануелно)	480	4.86 M РСД	-908,224 РСД	5.77 M РСД	292 %
Број смена (робот)	2	-865,646 РСД	4.82 M РСД	5.68 M РСД	288 %
Број радних дана месечно (робот)	22	-865,646 РСД	4.82 M РСД	5.68 M РСД	288 %
Трајање смене (робот)	480	-865,646 РСД	4.82 M РСД	5.68 M РСД	288 %
Време циклуса (мануелно)	8.43	-1.03 M РСД	3.98 M РСД	5.01 M РСД	253 %
Број радних дана месечно (мануелно)	22	4.38 M РСД	-427,390 РСД	4.81 M РСД	243 %
Број смена (мануелно)	2	4.38 M РСД	-427,390 РСД	4.81 M РСД	243 %
Цена производа	1,350	592,036 РСД	3.36 M РСД	2.77 M РСД	140 %
Трошак производње по произведеној јединици	870	2.85 M РСД	1.11 M РСД	1.74 M РСД	88 %
Број дефектних производа месечно (мануелно)	30	1.88 M РСД	2.07 M РСД	194,400 РСД	10 %
Број дефектних производа месечно (робот)	20	2.04 M РСД	1.91 M РСД	129,600 РСД	7 %
Цена робота	4,500,000	2.02 M РСД	1.93 M РСД	90,000 РСД	5 %
Потрошња електричне енергије	2.8	2.02 M РСД	1.93 M РСД	85,156 РСД	4 %
Цена електричне енергије	18	2.02 M РСД	1.93 M РСД	85,156 РСД	4 %
Месечни трошак одржавања	7,000	1.99 M РСД	1.96 M РСД	33,600 РСД	2 %
Трошак додатне опреме	1,100,000	1.99 M РСД	1.97 M РСД	22,000 РСД	1 %
Цена грипера	250,000	1.98 M РСД	1.97 M РСД	5,000 РСД	0

Када је реч о утицају квалитета на нето добит, реч је о значајно мањем утицају у односу на претходне параметре. Генерално, ефекти квалитета конзистентни су са претходним анализама осетљивости и указују на то да квалитет може имати позитиван

економски ефекат, али свакако секундарни у односу на продуктивност и обим производње.

Цена робота има очекивано низак утицај на нето добит, јер се она пре свега одражава на инвестиционе показатеље као што су нето садашња вредност и период повраћаја инвестиције, док је њен утицај на текућу добит ограничен. Још нижи утицај имају енергетски параметри, док трошкови одржавања, грипера и додатне опреме имају практично занемарљив утицај.

У табели 41 приказани су најзначајнији сегменти анализе осетљивости.

Табела 41 Најзначајнији сегменти анализе осетљивости

Индикатор	Најосетљивији фактор
Нето садашња вредност (директни ефекти)	Време циклуса (робот) 912%
Нето садашња вредност (проширени ефекти)	Трајање смене (мануелно) 623%
Период повраћаја инвестиције	Цена производа 275 %
Нето добит	Време циклуса (робот) 304%

Нето садашња вредност – директни ефекти и нето добит показују готово идентичну структуру доминантних фактора; код оба показатеља на првом месту је време циклуса (робот), а затим следе параметри радног режима. Насупрот томе, период повраћаја инвестиције је знатно осетљивији на цену производа, што показује да брзина повраћаја инвестиције има другачију структуру ризика од саме профитабилности и дугорочне вредности пројекта. Дакле, идентификовање кључних ризичних фактора зависи од критеријума инвестиционе евалуације. Инвестициони ризик се не може описати универзалним индикатором.

5.4.4 Итерација

У оквиру треће фазе *RSC* Сценарио А посматран је као тренутно најпогоднија конфигурација која улази у процес итеративног усавршавања. Сценарио А је евалуиран према дефинисаним КПИ критеријумима и праговима прихватљивости. У табели 42 дати су иницијални захтеви КПИ.

Табела 42 Дефинисани циљеви и предвиђене вредности у случају имплементације решења дефинисаног у оквиру Сценарија

КПИ	Дефинисани циљ	Предвиђена вредност
Нето садашња вредност – проширени ефекти	>3,7 мил рсд	4,11 мил рсд
Нето садашња вредност – директни ефекти	>2,5 мил рсд	2,93 мил рсд
Поврат на улагање	> 25%	33,80%
Период повраћаја инвестиције	<5 година	2,96 године
Нето добит	>10 мил рсд	13.511.870 рсд
Укупна ефикасност опреме	>0,85	0.86
Стопа дефеката	<1%	1%
Стопа одсуствовања због боловања	0	≈ 0
Стопа непоштовања безбедносних захтева	0	≈ 0

Резултати су показали да Сценарио А задовољава дефинисане финансијске, оперативне, захтеве квалитета и безбедности. С обзиром на то да су критеријуми прихватања достигнути, додатна оптимизација није оправдана са становишта очекиване маргиналне користи. Дакле, усвојен је критеријум заустављања и Сценарио А је у овом

облику задржан као коначно решење за прелазак у фазу пилот имплементације. Овом одлуком се не тврди да представљено решење представља апсолутни или теоријски оптимум, већ да је постигнут довољан ниво оптимизације за наставак процеса имплементације.

Другим речима, *ARIM* у овој тачки не захтева даље теоријско или техничко усавршавање решења по сваку цену, већ препознаје тренутну конфигурацију као адекватну основу за следећу фазу истраживања.

У табели 43 дат је преглед одлуке о заустављању итеративног процеса.

Табела 43 Одлука о заустављању итеративног процеса

Елемент одлуке	Резултат
Одабрани сценарио за итеративно усавршавање	Сценарио А
Провера дефинисаних КПИ захтева	Испуњени
Простор за даље унапређење	Постоји, али је ограничен
Маргинална корист даље оптимизације	Недовољна за наставак итерације
Одлука по *ARIM* критеријуму заустављања	Заустављање итеративног процеса
Решење које се преноси у наредну фазу	Сценарио А – последња оптимизована конфигурација

Важно је, међутим, да се ова одлука не тумачи као коначна валидација решења. Валидација следи у наредној фази *ARIM*-а, кроз пилот тестирање**,** где се Сценарио А преноси из аналитичког и симулационог окружења у реално производно окружење. Тек у тој фази могуће је утврдити да ли се очекиване перформансе заиста остварују у реалним условима и да ли су потребне додатне измене или пивот. Сценарио А, према томе, представља резултат оптимизационог процеса, а не резултат његове коначне валидације. Његово усвајање у овој фази означава да је достигнута тачка заустављања за даље аналитичко унапређење, након чега се решење преноси у пилот тестирање ради емпиријске валидације.

5.5 Пилот тестирање

Након завршене итеративне оптимизације у оквиру *RSC*-а Сценарио А је пренет у фазу пилот тестирања. За потребе емпиријске валидације формирана је флексибилна роботска станица. Флексибилна роботска станица имплементирана је у производном окружењу фабрике за производњу емајлираног посуђа. За разлику од претходне фазе, у фази пилот тестирања су након имплементације флексибилне роботске станице (ФРС) у производно окружење, перформансе су мерене на основу стварног рада система. Пилот тестирање требало је да потврди да се одабрано решење може интегрисати у постојећи производни процес без негативних утицаја на квалитет, продуктивност, безбедност или неки други сегмент. Осим тога, пилот тестирањем омогућена је провера реалне могућности реализације перформанси предвиђених *ARIM* моделом у оперативном производном окружењу. ФРС се састојала од колаборативног робота, крајњих ефектора специфичних за задатак, сензора, контролних и комуникационих интерфејса и неопходне интеграције са системом за подршку одлучивању заснованим на КПИ-јевима. Конфигурација је дизајнирана да задржи висок степен флексибилности.

Пилот имплементација дизајнирана је на начин да:

- Систем може брзо да се прилагоди променама у производном процесу,

- Промена алата или програма робота мора бити довољно једноставан да се прилагоди различитим варијантама производа или захтевима процеса,
- Мора постојати континуирано праћење индикатора дефинисаних у *ARIM* оквиру,
- Интеракција између оператера и робота се мора пратити,
- Морала је постојати итеративна адаптација на основу запажања добијених током стварне производње.

Архитектура ФРС-а је омогућила мања прилагођавања процеса, измену алата и подешавање параметара без промене основне концепције решења. На слици 42. приказана је радна станица након имплементације флексибилне роботске станице.



Слика 42 Радна станица након имплементације роботског решења

Пилот тестирање спроведено је у периоду од осам недеља. Подаци су прикупљани током континуираног рада система. Оперативни и технички параметри прикупљани су аутоматски, путем система за праћење рада. Подаци који се односе на оператера, интеракцију човека и робота, као и аспекте безбедности, допуњени су директним посматрањем. У почетном стадијуму посвећена је пажња пуштању у рад робота, подешавању параметара, конфигурацији алата, оптимизацији кретања и идентификацији непредвиђених интеракција роботске радне станице и околних производних процеса. Подаци су прикупљани аутоматски и запажањем производног особља као и истраживачког тима. Подаци који су прикупљани аутоматски су подаци везани за време циклуса, искоришћеност опреме, време рада, појаву отказа, и други. Потешкоће око подешавања алата, одступање од оперативних процедура, ергономија, интеракција оператера са роботом, и слични подаци прикупљани су од стране истраживачког тима директним посматрањем или комуникацијом са оператерима.

Прикупљени подаци омогућили су поновно рачунање кључних индикатора перформанси у развијеном софтверу. На овај начин методолошки је омогућено поређење предвиђених и реализованих резултата. Посебно се у обзир узима разлика између скупа резултата у виду апсолутних одступања између очекиваних и остварених перформанси. Имплементирана ФРС довела је до повећања времена рада анализиране радне станице, али то није подразумевало и повећање протока комплетног производног процеса. Производни капацитет зависан је од времена циклуса и ограничења капацитета наредних операција. Замена свих мануелних трансфера у линији довела би до значајног унапређења циклуса. Пилот евалуација направила је разлику између побољшања која се могу приписати радној станици и оних која би могла креирати додатни учинак на нивоу система. Потенцијално повећање продуктивности повезано са роботском радном станицом није тумачено искључиво повећањем њеног расположивог времена рада.

Уместо тога, примећене промене у току процеса, руковању серијама, времену чекања, искоришћењу радне станице и низводном капацитету узете су у обзир приликом процене да ли локално побољшање може довести до стварног повећања производње.

Пилот тестирање је представљало емпиријску фазу валидације процеса доношења одлуке. Док су претходне фазе *ARIM*-а биле засноване на расположивим производним подацима, пилот је омогућио директно поређење тих процена са резултатима добијеним у реалном производном окружењу. На тај начин процењена је способност *ARIM* методологије да релативно поуздано предвиди перформансе изабране конфигурације.

Поређење омогућава процену не само апсолутних перформанси роботизоване радне станице, већ и способности модела да предвиди понашање система у реалним условима. За сваки КПИ израчуната је апсолутна процентуална грешка:

$$APE_i = \frac{|Predicted_i - Realized_i|}{Realized_i} * 100$$

Одступања која су мања од 3% означена су на „ниска“, од 3% до 5% „средња“ и веће од 5% као „висока“. Код показатеља где је вредност једнака или приближно једнака нули, грешка је тумачена на основу апсолутне разлике.

У табели 44 дат је преглед предвиђених, реализованих, као и оцене одступања реализованих у односу на предвиђене кључне индикаторе перформанси.

Табела 44 Предвиђени, реализовани КПИ и оцена одступања

КПИ	Предвиђено	Реализовано	Грешка (%)	Оцена одступања
Нето добит	13.511.870 рсд	13.282.089 рсд	1,73	Ниска
Тачка рентабилности	6.526 ком	6.602 ком	1,15	Ниска
Укупна ефикасност опреме	0,86	0,85	1,17	Ниска
Стопа дефеката	1,0%	1,167%	14,31	Висока
Стопа одсуствовања због боловања	≈ 0	0	N/A	N/A
Трошак рада по радном сату	568 рсд	577 рсд	1,56	Ниска
Стопа непоштовања безбедносних захтева	≈ 0	0,05%	N/A	N/A
Време рада роботског система	4.224 *h*	4.180 *h*	1,05	Ниска
Нето садашња вредност – директни ефекти	2,93 мил рсд	2,87 мил рсд	2,09	Ниска
Нето садашња вредност – проширени ефекти	4,11 мил рсд	3,98 мил рсд	3,27	Средња
Повратак на улагање	33,80%	32,41%	4,29	Средња
Период повраћаја инвестиције	2,96 године	3,03 године	2,31	Ниска
Трошак инсталације по радном сату робота	2,34 рсд	2,42 рсд	3,31	Средња
Трошак обуке радника по произведеној јединици	0,24 рсд	0,24 рсд	0	Ниска
Трошак електричне енергије по произведеној јединици	7 рсд	7,21 рсд	2,91	Ниска
Трошак одржавања по радном сату робота	20 рсд	20 рсд	0	Ниска
Ослобођени радни капацитет	3.256 *h*/ год	3.206 *h*/год	1,56	Ниска
Коефицијент потрошње енергије	0,394 kWh/ком	0,399 kWh/ком	1,18	Ниска

Може се рећи да постоји висок степен слагања између предвиђених и реализованих вредности КПИ. Већина показатеља има ниско одступање, док је умерено одступање забележено код нето садашње вредности – проширени ефекти, повратa на улагање и трошка инсталације по сату рада. Највеће одступање је у случају КПИ стопа дефеката.

Одступање од 1,73% у случају нето добити указује на добро слагање предвиђеног и реализованог финансијског резултата. Добит је била нешто нижа од очекиване, али се сама одступања могу се приписати продуктивности и оперативном времену у почетном раду након имплементације ФРС. Слично је и у случају тачке рентабилности, где је одступање 1,15%. Ово свакако не утиче на закључак о економској оправданости Сценарија А. Када је реч о укупној ефикасности опреме, може се рећи да је ФРС остварила најмањи ниво укупне ефикасности предвиђен моделом. Стопа дефеката, иако процентуално 14,31%, у апсолутној разлици износи мање од 0,2 процентуална поена. Ова разлика је изузетно важна јер мала базна вредност и мала апсолутна промена могу резултирати релативно великим процентуалним одступањем. Стопа одсуствовања због боловања је приближна нули, и процентуално одступање које би било израчунато не би било математички репрезентативно. Реализован трошак рада по сату близу је предвиђеног, док је стопа неусклађености са безбедносним захтевима занемарљиво мала. Одступања у предвиђеном у односу на реализовано време рада роботског система могу се приписати непланираним застојима, оперативним прекидима или почетном периоду стабилизације система. Финансијски показатељи генерално указују на релативно добро слагање. Одступања су у распону од 1,15% до 4,29%. Мања одступања у нето утицају роботизације на радну снагу указују на то да је и након имплементације роботског решења остала потреба за људским ангажовањем у облику надзора, подешавања, интервенција и других помоћних активности. Претпоставке о потрошњи енергије биле су прилично добро претпостављене, док високо слагање постоји и у индексу инвестиционе ефикасности.

За добијање укупног показатеља предиктивне тачности израчуната је средња апсолутна процентуална грешка (енг. *Mean Absolute Percentage Error – MAPE*), по формули:

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} APE_i = \frac{41{,}97}{16} = 2{,}62\%$$

У прорачун је укључено 16 квантитативних КПИ показатеља код којих је процентуална мера одступања математички оправдана. Из рачунања средње апсолутне процентуалне грешке искључени су стопа одсуства због боловања и неусклађености са безбедносним захтевима.

Добијена вредност од 2,62% указује да постоји висок степен нумеричког слагања између предвиђених и реализованих резултата у анализираном случају.С обзиром да је пилот спроведен на једном случају, овај показатељ не треба дефинисати као доказ универзалне тачности *ARIM* модела. На одступања су утицали мањи непланирани застоји, почетна адаптација оператера, конзервативни параметри рада робота, и други услови који су резултирали нешто нижом продуктивношћу у односу на теоријски оптимизоване услове.

Пилот тестирање емпиријски је потврдило:

- Роботска конфигурација одабрана применом *ARIM*-а може се користити у реалним производним условима,

- Пилот омогућава идентификацију разлика између претпостављених и реалних услова рада,
- Од практичног је значаја праћење КПИ показатеља и њихово *ex ante, ex post* поређење.

Дакле, ФРС не представља технолошки демонстрациони систем, већ експерименталну платформу за валидацију *ARIM* методологије. Резултати показују да је могуће успоставити повратну спрегу између аналитичког доношења одлуке и физичке имплементације.

Овај приступ од изузетног значаја је за МСП где погрешна инвестициона одлука може имати значајне финансијске последице. Увођењем пилот тестирања пре пуне производне интеграције могуће је смањити неизвесност повезану са продуктивношћу, оперативним трошковима, квалитетом, безбедношћу и очекиваним инвестиционим резултатима. Иако резултати не омогућавају статистичку генерализацију, конзистентност примене предложеног приступа омогућава структурирано доношење одлука о имплементацији роботских решења. У случају значајног одступања *ARIM* предвиђа повратак на претходне фазе кроз нову итерацију или пивот. У посматраном случају оваква корекција није била потребна. На тај начин петља „Направи–Измери–Научи“ је затворена и доказана је предиктивна способност модела и практична применљивост *ARIM* приступа.

6. Дискусија

Централни резултат истраживања представља развој *ARIM* модела за подршку одлучивању о имплементацији роботских решења у *Lean* индустријским системима. Развијени модел преводи теоријске оквире у структурирани оквир који омогућава анализу инвестиционе оправданости имплементације роботских решења у условима неизвесности. Полазна претпоставка модела заснивала се на чињеници да сама инвестиција у роботско решење не може бити базирана искључиво на иницијалној инвестицији или номиналном капацитету робота с обзиром да утиче на различите параметре у оквиру производног система. При томе, номинални производни капацитет представља техничку величину, не мора да значи и реално остварив обим производње. На производни капацитет у индустријским системима након имплементације роботског решења могу утицати непланирани застоји, планирани прекиди, губици брзине и губици услед неусаглашености са захтевима квалитета. Укључивањем расположивости, перформанси и квалитета у процену ефективног производног обима, модел омогућава да се економски ефекти роботизације разматрају у контексту стварног начина функционисања производног система. Ово је посебно важно код инвестиција код којих постоји значајна разлика између технички декларисаних могућности опреме и њених очекиваних оперативних резултата. Имплементација роботског решења не посматра се као изолована инвестиција већ као интегративан део реалних услова функционисања производног система. Време које је расположиво за производњу, трајање смене и пауза, време циклуса, застоји и други показатељи трансформишу се у показатеље производног учинка, а затим у трошкове, приходе и новчане токове.

Развијени *ARIM* модел представља операционализацију принципа *Lean* производње, који наглашавају елиминацију губитака и континуирано унапређење, са специфичностима *Lean* роботике, где се роботизација посматра као средство за унапређење перформанси система, а не као циљ сам по себи. Истовремено, итеративност процене и могућност поновног испитивања сценарија након промене улазних параметара одражавају логику *Lean* стартап приступа, засновану на експериментисању, учењу и прилагођавању одлука на основу расположивих података. Посматрано кроз фазе *ARIM* модела, наведени приступи се не појављују као одвојене методолошке целине, већ као међусобно повезани принципи који усмеравају процес процене.

Вредност модела произилази и из чињенице повезивања директних и проширених ефеката роботизације. Директна процена базира се на оперативном профиту и капиталним издацима, док се резултат имплементације роботских решења посматра и кроз ефекте који се не могу у потпуности описати променом прихода и директних оперативних трошкова. Због тога економска процена обухвата и проширене ефекте као што су ослобођени радни капацитет, боловање, залихе, порески ефекти и друге релевантне категорије. Међутим, ослобађање радног капацитета не значи нужно и новчану уштеду уколико се запослени ангажује на другим активностима. Слично томе, уколико не постоји тражња на тржишту увећање техничког капацитета не значи нужно и повећање прихода. С обзиром на наведено, значајну улогу у моделу има и анализа осетљивости.

У модел је укључена једноваријантна анализа осетљивости којом је омогућено испитивање утицаја промене појединачних параметара на неки од КПИ-јева. Торнадо анализа омогућава рангирање параметара према величини њиховог утицаја. На тај начин, могу се идентификовати фактори који су кључни приликом доношења инвестиционе одлуке и који се морају додатно разматрати уколико нису стабилни.

Временска вредност новца се разматра коришћењем дисконтованих новчаних токова. Показатељи као што су нето садашња вредност, поврат на улагање, период повраћаја и индекс инвестиционе ефикасности омогућавају посматрање инвестиције из различитих перспектива.

Концептуални и математички ниво *ARIM* модела су операционализовани кроз софтвер који је употребљив као систем за подршку одлучивању. Операционализација модела кроз развијени софтверски алат указује на практичан допринос. Параметри који су међусобно повезани, као и кораци израчунавања КПИ, значајно би били ограничени без софтверске реализације. Улазни подаци се дефинишу у оквиру корисничког интерфејса, а прорачун се врши аутоматски. Резултати се приказују у облику који је погодан за интерпретацију. Уколико у међувремену због динамичности посматраних система дође до промене улазних параметара могуће је поново извршити процене у реалном времену. Сценарио је могуће мењати и ревидирати што омогућава да се одлуке базирају на ажурираним информацијама, при чему се производни систем у складу са логиком *Lean* роботике посматра као континуирани процес. Анализа система, процена роботског решења и евалуација реализују се као повратна спрега.

Презентациони слој, апликативни сервис, доменска логика и слој перзистенције раздвојени су у оквиру архитектуре софтвера што омогућава да математичка логика буде независна од начина приказа и складиштења података. Постојање посебног *TypeScript* прорачунског језгра за унакрсну проверу резултата из *backend*-а представља додатни механизам контроле математичке конзистентности. Поређењем резултата *Python* и *TypeScript* имплементација за исти скуп улазних података и постављањем прихватљиве границе разлике обезбеђена је провера да различите имплементације истих математичких правила дају еквивалентне резултате у оквиру дефинисане толеранције.

Посматрано у целини, *ARIM* као и развијени софтвер повезују различите категорије ефеката имплементације роботских решења у јединствен аналитички ток. Допринос истраживања представља интеграцију методолошког оквира, математичког модела и система за подршку одлучивању. Ова интеграција омогућава процену имплементације роботских решења као динамичне, холистичке промене производног система.

6.1 Разматрање постављених хипотеза

На основу резултата теоријског и емпиријског дела истраживања, у наставку се разматрају постављене хипотезе и њихова потврда у односу на развијени *ARIM* модел, реализовано софтверско решење и резултате студије случаја.

Хипотеза I: Конципирајући широк спектар фактора могуће је креирати модел који ће предвидети будуће стање Lean индустријског система као и предности и недостатке који проистичу из промена насталих услед имплементације роботског решења на место мануелне радне станице.

На основу дефинисаних улазних параметара модел омогућава процену економских, оперативних, перформанси које се односе на квалитет и ергономију. Модел посматра промену различитих фактора и њихов утицај на економске показатеље инвестиције. На тај начин омогућава се идентификовање потенцијалних користи и ограничења имплементације роботског решења. Сам приступ у складу је са принципима *Lean* производње. Утицај имплементације роботског решења посматра се кроз промене

у целом производном систему и елиминацију губитака. Развијени модел омогућава поновно испитивање претпоставки и имплементира итеративну логику *Lean* стартап приступа.

Хипотеза II: Симулирањем процеса производње у реалном индустријском окружењу могуће је са високом тачношћу и са уштедом у времену одредити мануелну радну станицу коју треба заменити адекватним роботским решењем у сврху унапређења ефективности и ефикасности процеса производње.

Резултати примене модела и софтверског решења показују да се подаци о постојећем мануелном процесу могу користити за поређење са сценаријем роботизације. На тај начин могуће је проценити промене у времену циклуса, производном капацитету, расположивости, перформансама и квалитету, пре физичке имплементације роботског решења и то са различитим роботским решењима и на различитим радним станицама. Оваква анализа омогућава да се избор радне станице и роботског решења заснива на очекиваним системским ефектима, а не само на појединачној техничкој карактеристици робота.

Хипотеза III: Задавањем параметара резултата симулације процеса производње и конкретног роботског решења које ће бити имплементирано у оквиру Lean индустријског система могу се добити прецизне информације о времену повраћаја инвестиције и преломној тачки рентабилности.

Развијени *ARIM* модел омогућава да се технички и производни параметри конкретног сценарија трансформишу у финансијске показатеље инвестиције. На основу дефинисаних капиталних издатака, оперативних трошкова, прихода и промена у производном обиму израчунавају се период повраћаја инвестиције, поврат на улагање, нето садашња вредност и тачка рентабилности. Додатним укључивањем директних и проширених ефеката омогућена је свеобухватнија процена економске оправданости.

Хипотеза IV: Развијени модел може бити примењен у Lean индустријским системима без обзира на величину и делатност.

Модуларна структура *ARIM* модела и развијеног софтверског решења омогућавају измену улазних параметара и конфигурацију различитих производних сценарија без измене основне математичке логике.

Ипак, применљивост модела не треба тумачити као потпуну независност од специфичности индустрије. Резултати зависе од доступности и квалитета улазних података, као и од адекватног подешавања параметара за конкретан производни систем. Због тога се универзалност модела пре свега огледа у његовој структури и могућности реконфигурације, а не у претпоставци да исти параметри и тежине важе за сва индустријска окружења.

6.2 Ограничења модела

Резултате развоја модела потребно је посматрати уз одређена ограничења.

Модел може да се посматра као аналитички инструмент у оквиру процеса одлучивања. Показатеље добијене применом модела и софтвера за операционализацију модела свакако треба тумачити у контексту подршке одлучивању, а не као замену за експертску одлуку. Оно што моделом није квантификовано из угла експерта свакако

може бити разматрано пре саме коначне одлуке. Неки од ових ефеката односе се на организационе промене, стратешке приоритете, ризик имплементације или друге специфичности индустријског система у којем се разматра имплементација роботског решења.

Модел је заснован на детерминистичком приступу улазним параметрима, што значи да се за конкретан сценарио користе дефинисане вредности параметара, док се неизвесност њиховог будућег остварења не представља експлицитно расподелама вероватноће. Ово је посебно релевантно за параметре као што су будући производни обим, време застоја, трошкови одржавања, цене енергије и други фактори који могу варирати током експлоатационог периода. У том смислу, анализа осетљивости представља користан, али не и потпун одговор на проблем неизвесности.

Поред наведеног, квалитет и доступност улазних података директно утичу на резултате модела. Уколико улазни подаци нису добро процењени, уколико су непотпуни или су мерени у специфичном периоду, може доћи до погрешних резултата. Због тога је неопходно приликом имплементирања модела систематично разматрати податке.

Додатно ограничење односи се на обухват ефеката имплементације роботских решења. Иако сам модел интегрише различите перформансе није могуће све последице имплементације изразити новчано или у другим квантитативним показатељима. Неки од ових фактора су флексибилност производње или технолошке компетенције запослених. Због тога модел треба посматрати као део процеса инвестиционог одлучивања.

Коначно, применљивост модела у различитим индустријским системима не подразумева да ће претпоставке модела бити релевантне у свим производним окружењима. Универзалност модела се огледа у структури и методолошком оквиру, али не и у претпоставци да исти параметри подједнако описују све индустријске системе.

Наведена ограничења истовремено представљају и полазиште за будућа истраживања.

6.3 Будући правци истраживања

Следећи логичан корак развоја модела представљао би прелазак са детерминистичке на стохастичку процену. Додељивањем одговарајућих расподела вероватноће кључним улазним параметрима било би могуће проценити не само једну вредност инвестиционог показатеља, већ и расподелу могућих исхода. Такав приступ омогућио би процену вероватноће да инвестиција оствари позитивну нето садашњу вредност, као и идентификацију параметара који највише доприносе ризику инвестиционе одлуке. Ово представља природан правац даљег развоја *ARIM* приступа.

Други правац истраживања свакако подразумева даљу валидацију модела кроз већи број индустријских система и студија случаја. Поређење резултата модела и реализованих перформанси омогућило би додатно испитивање предиктивне способности модела и идентификовање параметара које је потенцијално потребно додатно калибрисати.

Додатно, модел би могао бити проширен укључивањем фактора као што су развој компетенција запослених, прихватање роботских решења од стране запослених и флексибилност производње. Ово би додатно допринело јачању модела као система за подршку вишекритеријумском инвестиционом одлучивању.

7. Закључак

Предмет истраживања ове докторске дисертације био је развој модела за подршку одлучивању о имплементацији роботских решења у *Lean* индустријским системима. Полазећи од идентификованог теоријског јаза, истраживање је усмерено на повезивање принципа *Lean* производње, *Lean* роботике и *Lean* стартапа са проценом имплементације роботских решења. Као резултат истраживања развијен је *ARIM* модел који омогућава да се ефекти инвестиције процене пре њене имплементације и реализације у пуном обиму.

Математичка и методолошка логика модела операционализована је кроз софтверско решење. Софтвер омогућава анализу различитих сценарија, њихово поређење, израчунавање КПИ и анализу осетљивости резултата.

Основни допринос истраживања огледа се у приступу који посматра имплементацију роботског решења као интегративни део производног система, и њене ефекте прати кроз више међусобно повезаних фактора. Подаци који се реализују у мануелном процесу рада и подаци који се очекују имплементацијом роботског решења трансформишу се у оперативне, економске, показатеље квалитета и ергономије.

Посебан допринос модела огледа се у процени ефеката имплементације роботских решења пре физичке имплементације. Имплементација роботских решења не своди се на избор техничких карактеристика, већ се повезује са проблемима и условима у конкретном производном систему.

Резултатима истраживања потврђене су постављене хипотезе. Четврта хипотеза („*Развијени модел може бити примењен у Lean индустријским системима без обзира на величину и делатност”)* је потврђена делимично јер се сматра да конкретни резултати примене модела зависе од расположивости и квалитета улазних података као и од самих специфичности система. У том смислу, потребно је више емпиријских валидација модела.

Научни допринос огледа се у развоју *ARIM* модела, док се практични допринос огледа у развијеном софтверском систему који омогућава операционализацију модела. Повезивањем принципа *Lean* производње, *Lean* роботике и *Lean* стартапа успостављен је приступ у којем се роботизација посматра као итеративни процес унапређења производног система, а не као једнократна инвестициона одлука.

Резултате истраживања потребно је тумачити уз ограничења која произлазе пре свега из детерминистичког карактера модела. Као правац будућег истраживања намеће се развој стохастичке верзије модела.

У целини, истраживање је резултирало развојем методолошког, математичког и софтверског оквира који омогућава систематичну процену имплементације роботских решења и представља основу за одлучивање засновано на подацима у унапређењу *Lean* индустријских система.

Литература

Abar, S., Theodoropoulos, G., Lemarinier, P., & O'Hare, G. (2017). Agent based modelling and simulation tools: A review of the state-of-the-art software. *Computer Science Review, 24*, 13-33.

Abdulmalek, F., & Rajgopal, J. (2007). Analyzing the Benefits of Lean Manufacturing and Value Stream Mapping via Simulation: A Process Sector Case Study. *International Journal of Production Economics, 107* (1), 223-236.

Abdul-Nour, G., Lambert, S., & Drolet, J. (1998). Adaption of JIT philosophy and Kanban technique to a small-sized manufacturing firm. *Computer Industry Engineering, 35* (3), 419-422.

Accorsi, R., Tufano, A., Gallo, A., Galizia, F., Cocchi, G., Ronzoni, M., Abbate, A., Manzini, R. (2019). An application of collaborative robots in a food production facility. *Procedia Manufacturing, 38*, 341-348.

Aceto, G., Persico, V., & Pescape´, A. (2020). Industry 4.0 and Health: Internet of Things, Big Data, and Cloud Computing for Healthcare 4.0. *Journal of Industrial Information Integration*, 1-14.

Adbirad, K., Krishnan, K., & Gupta, D. (2021). A two-stage metaheuristic algorithm for the dynamic vehicle routing problem in Industry 4.0 approach. *Journal of Management Analytics, 8* (1), 69-83.

Agarwal, H., & Agarwal, R. (2017). First Industrial Revolution and Second Industrial Revolution: Technological Differences and the Differences in Banking and Financing of the Firms. *Saudi Journal of Humanities and Social Sciences, 2* (11a), 1062-1067.

Alcacer, V., & Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, 22*, 899-919.

Arlbjorn, J., & Freytag, P. (2013). Evidence of Lean: A Review of International Peer-reviewed Journal Article. *European Business Review, 25* (2), 174-205.

Arunagiri, P., & Gnanavelbabu, A. (2014). Identification of Major Lean Production Waste in Automobile Industries using Weighted Average Method. *Procedia Engineering, 97*, 2167-2175.

Asatiani, A., & Penttinen, E. (2016). Turning roboic process automation into commercial success - Case OpusCapita. *Journal of Information Technology Teaching Cases, 6* (2), 67-74.

Ashton, T. (1948). *The Industrial Revolution (1760-1830).* London and New York: Oxford University Press.

Banks, J. (1998). *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications and practice.* John Wiley & Sons.

Battaia, O., Otto, A., Sgarbossa, F., & Pesch, E. (2018). Future trends in management and operation of assembly systems: from customized assembly systems to cyber-physical systems. *Omega, 78*, 1-4.

Bernard, A., Redding, S., & Schott, P. (2010). Multiple-product firms and product swiching. *The American Economic Review, 100* (1), 70-97.

Bhamu, J., & Sangwan, K. (2014). Lean manufacturing: literature review and research issues. *International Journal of Operations & Production Management, 34* (7), 876 - 940.

Blank, S., & Dorf, B. (2012). *The startup owners manual: The step-by-step guide for building a great company*. K&S Ranch.

Borshchev, A. (2013). *The big book of simulation modeling multimethod: modeling with AnyLogic.* Chicago, North America: AnyLogic.

Botti, L., Mora, C., & Regattieri, A. (2017). Integrating Ergonomic and Lean Manufacturing Principle in a Hybrid Assembly Line. *Computer & Industrial Engineering*, 111, 481-491.

Bouchard, S. (2017). *Lean Robotics: A Guide to Making Robots Work in Your Factory.* Samuel Bouchard.

Boughton, N., & Arokiam, I. (2000). The application of cellular manufacturing: A regional small to medium enterprise perspective. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 214*, 751 - 754.

Boyd, J. (1986). *Patterns of Conflict.* Retrieved from http://www.ausairpower.net/JRB/poc.pdf

Brailsford, S., Eldabi, T., Kunc, M., Mustafee, N., & Osorio, A. (2019). Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-art review. *European Journal of Operational Research, 278* (3), 721-737.

Branco, T., Sa-Soares, F., & Rivero, A. (2017). Key issues for the successful adoption of cloud computing. *Procedia Computing Science*, 121, 115-122.

Brans, J., & Vincke, P. (1985). *A preference ranking organisation method (PROMETHEE).* Management Science.

Buer, S., Strandhagen, J., & Chan, F. (2018). The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda. *International Journal of Production Research, 56* (4), 1-17.

Caroll, K. (2021). Robotics: Considerations for Practice. *Nursing science quarterly, 34* (3), 253-255.

Chandandeep, G. (2008). An initiative to implement Lean manufacturing using value stream mapping in a small company. *International Journal of Manufacturing Technology and Management, 15* (3), 404.

Chang, S. (2004). Venture capital financing, strategic alliances, and the initial public offering of Internet startups. *Journal of Business Venturing, 19* (5), 721 - 741.

Chauhan, C., Singh, A., & Luthra, S. (2021). Barriers to industry 4.0 adoption and its performance implications: An empirical investigation of emerging economy. *Journal of Clearner Production, 285*, 124809.

Chen, J., Li, Y., & Shady, B. (2010). From value stream mapping toward a Lean/sigma continuous improvement process: an industrial case study. *International Journal of Production Research, 48* (4), 1069 - 1086.

Cimini, C., Pirola, F., Pinto, R., & Cavalieri, S. (2020). A human-in-the-loop manufacturing control architecture for the next generation of production systems. *Journal of Manufacturing Systems, 54*, 258 - 271.

Colim, A., Morgado, R., Carneiro, P., Costa, N., Faria, C., Sousa, N., et al. (2021). Lean Manufacturing and Ergonomics Integration: Defining Productivity and Wellbeing Indicators in a Human-Robot Workstation. *Sustainability, 13* (4), 1931.

Comm, C., & Marhaisel, D. (2005). A case study in applying lean sustainability concepts to universities. *International Journal of Sustainability in Higher Education, 6*, 134-146.

Cook, D., Bikkani, A., & Carter, J. (2023). Evaluating education innovations rapidly with build-measure-learn: applying lean startup to health professions education. *Medical Teacher, 45* (2), 167 - 178.

Cullinane, S., Bosak, J., Flood, P., & Demerouti, E. (2014). Job design under Lean manufacturing and the quality of working life: a job demands and resources perspective. *International Journal of Human Resource Management, 25*, 2996-3015.

Dalenogare, L., Benitez, G., Ayala, N., & Frank, A. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *I Journal of Production Economics, 204*, 383 - 394.

Dankbaar, B. (1997). Lean production: denial, confirmation or extension of sociotechnical systems design? *Human Relations, 50* (5), 239-250.

Das, I., & Dennis, J. (1997). A closer look at drawback of minimizing weighted sum of objectives for Pareto set generation in multicriteria optimization problems. *Structural and Multidisciplinary Optimization, 14* (1), 63-69.

Davenport, T. (1993). *Process Innovation: Reengineering work through information technology.* Boston, Massachusetts: Harvard Business School Press.

Deb, S., Chakraborty, A., & Bhattacharya, R. (2010). Effects of lean tools in small scale enterprises. *Drishtikon: A Management Journal, 2* (1), 149-165.

Dekle, R. (2020). Robots and industrial labor: Evidence from Japan. *Journal of the Japanese and International Economies, 58*, 101108.

Deming, W. (1986). *Out of the Crisis.* Boston, Massachusetts, USA: MIT Press.

Dickman, E. (2007). Elektronische Kanban-Systeme (eKanban). In P. Dickman, *Schlanker Materialfluss: mit Lean Production, Kanban und Innovation* (pp. 340-347). Berlin, Heidelberg, New York: Springer Vieweg.

Dombrowski, U., & Mielke, T. (2015). *Ganzheitliche Produktionssysteme. Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen.* Berlin.

Dombrowski, U., Richter, T., & Krenkel, P. (2017). Interdependencies of Industrie 4.0 & Lean Production Systems: a use case analysis. *Procedia Manufacturing , 11*, 1061-1068.

Dora, M., Kumar, M., Goubergen, D., Molnar, A., & Gellynsk, X. (2013). Application of Lean practices in small and medium-sized food enterprises. *British Food Journal, 116* (1), 125 - 141.

Duarte, S., & Cruz-Machado, V. (2019). Green and lean supply-chain transformation: a roadmap. *Production planning & control, 30* (4), 1170-1183.

Dzedzickis, A., Subačiute-Žemaitiene, J., Šutinys, E., & Samukaite-Bubniene, U. (2021). Advanced Applications of Industrial Robotics: New Trends and Possibilities. *Applied Sciences, 12* (1), 1-25.

Eisenmann, T., Ries, E., & Dillard, S. (2011). Hypothesis-Driven Enterpreneurship: The Lean Startup. *Harvard Business School Cackground Note 812-095*, 1-23.

El Marghy, H., & Cahhiano, A. (2019). Flexible Manufacturing System. In S. Chatti, L. Laperriere, G. Reinhart, & T. Tolio, *CIRP Encyclopedia of Production Engineering.* Berlin, Haidelberg: Springer.

El Zaatari, S., Marei, M., Li, W., & Usman, Z. (2019). Cobot programming for collaborative industrial tasks: an overview. *Robotics and Autonomous Systems, 116*, 162 - 180.

Erol, S., Jager, A., Hold , P., Ott K., & Sihn, W. (2016). Tangible industry 4.0: a scenariobased approach to learning for the future of production. *Procedia CIRP, 54*, 13 - 18.

Esmaeilian, B., Behdad, S., & Wang, B. (2016). The evolution and future of manufacturing: a review. *Journal of Manufacturing Systems, 39*, 79-100.

Felin, T., Gambardella, A., Stern, S., & Zenger, T. (2020). Lean startup and the business model: Experimentation revisited. *Long Range Planning, 53*, 1-7.

Fercoq, A., Lamouri, S., & Carbone, V. (2016). Lean/Green integration focused on waste reduction techniques. *Journal of Cleaner Production, 137*, 567-578.

Ferreira, W., Armellini, F., & De Santa Eulalia, L. A. (2020). Simulation in Industry 4.0: A state-of-the-art review. *Computers & Industrial Engineering, 149*, 1-17.

Fitzgerald, M., Kruschwitz, N., Bonnet, D., & Welch, M. (2013). *Embracing Digital Technology: A New Strategic Imperative.* MIT Solan Manaagement Review.

Flynn, B., Sakakibara, S., Schroeder, R., Bates, K., & Flynn, E. (1990). Empirical Reserach Methods in Operations Management. *Journal of Operations Management, 9* (2), 250-284.

Ford, H. (1926). *Today and Tomorow.* New York: Doubleday, Page & Company.

Fox, J., & Smeets, V. (2011). Does input quality drive measured differences in firm productivity? *International Economic Review, 52* (4), 961-989.

Galin, R., & Meshcheryakov, R. (2019). Automation and robotics in the context of Industry 4.0: The shift to collaborative robots. *OP Conference Series: Materials Science and Engineering, 537*, pp. 1-6.

Gamage, P., Jayamaha, N., & Grigg, N. (2016). Acceptance of Taguchi's quality philosophy and practice by Lean practicioners in apparel manufacturing. *Total Quality Management & Business Excellence, 28* (11 - 12), 1 - 17.

Ghelani, H. (2021). Advances in Lean Manufacturing: Improving Quality and Efficiency in Modern Production Systems. *International Journal of Scientific Research and Management, 9*, 611-625.

Ghobakhloo, M. (2019). Industry 4.0 digitalization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production, 252*, 1-21.

Giberti, H., Abbattista, T., Carnevale, M., Giagu, L., & Cristini, F. (2022). A methodology for flexible implementation of collaborative robots in smart manufacturing systems. *Robotics, 11* (1).

Gilbeth, F. (1917). *Applied Motion Study.*

Gomes Rossi, A., Bueno Marcondes, G., Pontes, J., Leitao, P., Tavaares Treinta, F., De Resende, L., Mosconi, E., Tadashi Yoshino, R. (2022). Lean Tools in the Context of Industry 4.0: Literature Review, Implementation and Trends. *Sustainability, 14* (19), 12295.

Grau, A., Indri, M., Lo Bello, L., & Sauter, T. (2021). : The Past, Present, and Future of a Growing Collaboration With Humans, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 15 (1), 50-61.

Gregor, S., & Hevner, A. (2013). Positioning and presenting design science research for maximum impact. *MIS Quarterly, 37* (2), 337-355.

Gunday, G., Ulusoy, G., Kilic, K., & Alpkan, L. (2011). Effects od innovation types on firm performance. *International Journal of Production Economics, 133* (2).

Han, D., Weber, J., Bastiaansen, M., Mitas, O., & Lub, X. (2020). Blowing your mind: A conceptual framework of augmented reality and virtual reality enhanced cultural visitor experiences using EEG experience measures. *International Journal of Technology Marketing, 14* (1), 47-68.

Hashem, I., Yaqoob, I., Anuar, N., Mokhtar, S., Gani, A., & Khan, S. (2015). The rise of "big data" on cloud computing: review and open research issues. *Information Systems Journal, 47*, 98-115.

Hassan, A., & Abomoharam, M. (2017). Modeling and Design Optimization of a Robot Gripper Mechanism. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 46*, 94-103.

Herman, M., Pantek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for Industrie 4.0 scenarios. *2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)* (pp. 3928-3937). IEEE.

Hevner, A., March, S., Park, J., & Ram, S. (2004). Design science in information systems. *MIS Quarterly, 28* (1), 75-104.

Hines, P., & Rich, N. (1997). The Seven Value Stream Mapping Tools. *International Journal of Operations & Production Management, 17* (1), 46-64.

Ho, G., Lau, H., Lee, C., & Ip, A. (2005). An intelligent froward quality enhancement system to achieve product customization. *Industrial Management and Data Systems, 105* (3), 384-406.

Holm, M., & Schnell, M. (2022). Challenges for manufacturing SMEs in the introduction of collaborative robots. *10th Swedish Production Symposium (SPS2022)* (pp. 173 - 183). IOS Press.

Hu, Q., Mason, R., Williams, S., & Found, P. (2015). Lean implementation within SMEs: a literature review. *Journal of Manufacturing Technology Management, 26* (7), 980 - 1012.

Huang, P.-C., & Mok, A. K. (2018). A Case Study of Cyber-Physical System Design: Autonomous Pick-and-Place Robot. *24th International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA)* (pp. 22-32). IEEE.

Hwang, C., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications.* Springer.

IFR. (2025, September 25). *World Robotics 2025 report – INDUSTRIAL ROBOTS – released by IFR*. Retrieved August 19, 2026, from IFR International Federation of Robotics: https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-robot-demand-in-factories-doubles-over-10-years

Intel. (n.d.). *Types of Robots: How Robotics Technologies Are Shaping Today's World*. Retrieved February 02, 2024, from intel:

https://www.intel.com/content/www/us/en/robotics/types-and-applications.html#:~:text=The%20six%20most%20common%20types,humanoids%2C%20cobots%2C%20and%20hybrids

Iqbal, R., Doctor, F., More, B., Mahmu, S., & Yousuf, U. (2020). Big data analytics: Computational intelligence techniques and application areas. *Technological Forecasting and Social Change*, 1-13.

ISO. (2021). *ISO 8373:2021 - Robotics: Vocabulary.* Retrieved August 2025, 12, from https://www.iso.org/standard/75539.html

Jain, P., Garg, S., & Kansal, G. (2022). Implementation of mass customization for competitive advantage in Indian industries: an empirical investigation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 121* (1-2), 737-752.

Jasarevic, A., & Colomo-Palacios, R. (2022). Lean Robotics: A Multivocal Literature Review. *International Conference on Computational Science and Its Applications - ICCSA 2022* (pp. 436-446). Springer, Cham.

Jasti, N., & Kodali, R. (2014). A literature review of empirical research methodology in Lean manufacturing. *International Journal of Operations & Production Management, 34* (8), 1080 - 1122.

Jordan, E., Kušar, J., Rihar, L., & Berlec, T. (2019). Portfolio analysis of a Lean Six Sigma production process. *Central European Journal of Operations Research, 27*, 797-813.

Joubair, A. (2021, July 27). *What are Accuracy and Repeatability in Industrial Robots.* Retrieved February 03, 2024, from Robotiq: https://blog.robotiq.com/what-are-accuracy-and-repeatability-in-industrial-robots

Juran, J. (1989). *Juran on Quality by Design.*

Kadir, B., Broberg, O., Souza da Conceicao, C. (2018). Designing human-robot collaborations in Industry 4.0: explorative case studies. *DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*, (pp. 601 - 610).

Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recomendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0.* Germany: Heilmayer und Sernau.

Kamble, S., Gunasekaran, A., & Sharma, R. (2018). Analysis of the driving and dependence power of barriers to adopt Industry 4.0 in Indian manufacturing industry. *Computers in Industry, 101*, 107-119.

Karakus, G., Ozturk, S., & Guldogan, A. (2021). An SME examination on the effect of transition to automation systems on productioin performance. In N. Durakbasa, & M. Gencyilmaz, *Digital conversion on the way to Industry 4.0.* Springer, Cham.

Karlsson, C., & Ahlstrom, P. (1996). Assessing changes towards lean production. *International Journal of Operations & Production Management, 16* (2), 24-41.

Keshvarparast, A., Battini, D., Barraia, O., & Pirayesh, A. (2023). Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: literature review and future research agenda. *Journal of Intelligent Manufacturing, 35*, 2065-2118.

Khan, W., Rehman, M., Zangoti, H., Afzal, M., Armi, N., & Salah, K. (2020). Industrial Internet of Things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. *Computer & Electrical Engineering, 81* (106522).

Khan, Z., Bali, R., & Wickramasinghe, N. (2007). Developing a BPI framework and PAM for SMEs. *Industrial Management and Data Systems, 107* (3), 345-360.

Kiel, D., Arnold, C., & Voigt, K. (2017). The influence of the industrial internet of things on business models of established manufacturing companies - a business level perspective. *Technovation, 68*, 4 - 19.

Kiel, D., Muller, J., Arnold, C., & Voigt, K. (2017). Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of Industry 4.0. *Indternational Society for Professional Innovation Management*, 1-21 .

Klotz, L., Horman, M., Bi, H., & Bechtel, J. (2008). The Impact of Process Mapping on Transparency. *International Journal of Productivity and Performance Management, 57* (8), 623-636.

Kolberg, D., & Zuhlke, D. (2015). Lean automation enabled by Industry 4.0 technologies. *IFACPapersOnLine, 48* (3), 1870 - 1875.

Kolberg, D., Knobloch, J., & Zuhlke, D. (2017). Towards a Lean automation interface for workstations. *International Journal of Production Research, 55* (10), 2845-2856.

Koren, Y., & Shpiralni, M. (2010). Design of reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems , 29* (4), 130-141.

Koren, Y., Gu, X., & Guo, W. (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends. *Frontiers of Mechanical Engineering, 13*, 121-136.

Kumar, H. M. (2019). The First Industrial Revolution: Creation of a New Global Human Era. *Journal of Social Sciences and Humanities, 5* (4), 377-387.

Kumar, M., Antony, J., Singh, R., Tiwari, M., & Perry, D. (2006). Implementing the Lean Sigma framework in an Indian SME: a case study. *Production Planning & Control, 17* (4), 407-423.

Kutnjak, A., Pihir, I., & Tamačić Furjan, M. (2019). Digital Transformation Case Studies Across Industrues - Literature Review. *MIPRO*, 1293-1298.

Lachenmaier, J., Lasi, H., & Kemper, H.-G. (2017). Simulation of Production Processes Involving Cyber-Physical Systems. *Procedia CIRP*, 577-582.

Lau, H. W., Jiang, B., Chan, F. S., & Ip, R. L. (2002). An innovative scheme for product and process design. *Journal of Materials Processing Technology, 123* (1), 85-92.

Lechler, T., Fischer, E., Metzner, M., Магод, A., & Franke, J. (2019). Virtual commissioning - scientific review and exploratory use cases in advanced production systems. *Procedia CIRP, 81*, 1125-1130.

Lee, C. (2004). TQM in small manufacturers: an exploratory study in China. *International Journal of Quality & Reliability Management, 21* (2), 175-197.

Leenes, R., Palmerini, E., Koops, B.-J., Bertolini, A., Salvini, P., & Lucivero, F. (2017). Regulatory challenges of robotics: some guidelines for addressing legal and ethical issues. *LAW, INNOVATION AND TECHNOLOGY, 9* (1), 1-44.

Li, H., Tan, K., & Hida, A. (2011). Sustaining growth in electronic manufacturing sector: lessons from Japaness EMS providers. *International Journal of Production Research, 49* (18), 5415 - 5430.

Li, M., Duan, Y., He, X., & Yang, M. (2020). Image positioning and identification method and system for coal and gangue sorting robot. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 1-19.

Li, S., Xu, L. D., & Zhao, S. (2015). The internet of things: a survey. *Information Systems Frontiers, 17*, 243-259.

Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E., & Ramos, L. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research, 55* (12), 3609 - 3629.

Liker, J. (1996). *Becoming Lean.* New York: Free Press.

Liker, J. (2020). *The Toyota Way, Second Edition* (2nd edition ed.). McGraw-Hil.

Lipson, H. (2014). Challenges and opportunities for design, simulation, and fabrication of soft robots. *Soft Robotics, 1* (1), 21-27.

Luintel, K., Khan, M., & Theodoridis, K. (2014). On the robustness of R&D. *Journal of Productivity Analysis, 42* (2), 137-155.

Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (2015). Internet of Things (IoT): A Literature Review. *Journal of Computer Communication, 3*, 164-173.

Makrini, I., Merckaert, K., Lefeber, D., & Vanderborght, B. (2017). Design of a collaborative architecture for human-robot assembly tasks. *Proceedings of the 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2017)* (pp. 1624-1629). Vancoucer, Canada: IEEE.

Malik, A., & Bilberg, A. (2019). Developing a reference model for human-robot interaction. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 1-7.

Mathur, A., Mittal, M., & Dangayach, G. (2012). Improving productivity in Indian SMEs. *Production Planning & Control, 23* (10), 754 - 768.

Matt, C., Hess, T., & Benlian, A. (2015). Digital transformation strategies. *Business & Information Systems Engineering, 57* (5), 339 - 343.

Mattias, W. (2016). *Introduction to Autonomous Robots.* Goteborg, Sweden: Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology.

Mcgrath, R., & Macmillan, I. (1995). Discovery Driven Planning: Turning Conventional Planning on its Head. *Harvard Business Review, 73* (4), 44-54.

Mehrez, A., Hu, M., & Offodile, O. (1996). Multivariate economic analysis of robot performance repeatability and accuracy. *Journal of Manufacturing Systems, 18* (4), 215-225.

Melville, N., Gurbaxani, V., & Kraemer, K. (2007). The productivity impact of information technology across competitive regimes: the role of industry concentration and dynamism. *Decision Support Systems, 43* (1), 229-242.

Messac, A., & Mattson, C. (2002). Generating Well-Distributed Sets of Pareto Points for Engineering Design using Physical Programming. *Optimization and Engineering, 3*, 431-450.

Min, X., Jeanne, D. M., & Sku, H. K. (2018). The Fourth Industrial Revolution: Opportunities and Challenges. *International Journal of Financial Research, 9* (2), 90-96.

Mital, M., Chang, V., Choudhary, P., Papa, A., & Pani, A. (2017). Adoption of internet of things in India: a test of competing models using a structured equation modeling approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 339-346.

Mokyr, J. (1998). *The Second Industrial Revolution.* Evanston, IL: Northwestern University.

Motyl, B., Baronino, G., Uberti, S., Speranza, D., & Filippi, S. (2017). How will change the future engineer's skills in the industry 4.0 framework. *Procedia Manufacturing, 11*, 1501-1509.

Moyano-Fuentes, J., & Sacristan-Diaz, M. (2012). Learning on Lean: A Review of Thinking and Research. *International Journal of Operations and Production Management, 32* (5), 551-582.

Mrugalska, B., & Wyrwicka, M. K. (2017). Towards Lean Production in Industry 4.0. *Procedia Engineering*, 466 - 473.

Nayyar, A., & Kumar, A. (2020). *A roadmap to Industry 4.0: Smart production, sharp budiness and sustainable development.* Cham: Springer Nature Switzerland AG.

Nikolic, N., Caiazzo, C., Djapan, M., Macuzic, I., Milojevic, D., & Jovicic, A. (2023). Whether to implement robotic solutions in Lean industrial systems: A decision based on financial indicators. *Conference: IS'23 - 19th International Scientific Conference on Industrial Systems.* Novi Sad.

Nikolic, N., Djapan, M., Damjanovic, A., Radenkovic, M., & Macuzic, I. (2023). Implementation of Robotics for Lean manufacturing improvement. *International Journal for Quality Research, 17* (3), 1127-1140.

Nikolic, N., Milojevic, D., Macuzic, I., Todorovic, P., & Djapan, M. (2026). ARIM: A Technology Management Framework for Agile and KPI-Driven Robotics Adoption in SMEs. *Eng, 7* (8), 413.

Nikolić, N., Caiazzo, C., Macuzic, I., Kauppila, O., Vukicevic, A., & Djapan, M. (2025). Use of a Genetic Algorithm to Determine the Optimal Path for the Autonomous Mobile Robot. *12th International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (IcETRAN)*, (pp. 196-200). 9-12 June, Čačak.

Nzue, R.-M. A., Brethe, J. F., Vasselin, E., & Lefebvre, D. (2010). Comparative Analysis of the Repearability Performance of a serial and parallel robot. *International Conference on Intelligent Robots and Systems.*

Ohno, T. (1988). *The Toyota Production System: Beyond Large-scale production.* Portland: OR: Productivity Press.

Oliveras-Alarcos, A., Foix, S., & Alenya, G. (2019). On inferring intentions in shared tasks for industrial collaborative robots. *Electronics, 8* (11), 1-22.

Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2010). *Business Model Generation.* Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Papadopoulou, T., & Ozbayrak, M. (2005). Leanness: Expiriences from the Journey to Date. *Journal of Manufacturing Technology Management, 16* (7), 95-112.

Patem, L., & Desai, D. (2018). Critical review and analysis of measuring the success of Six Sigma implementation in manufacturing sector. *International Journal of Quality & Reliability Management,* 35 (8), 1519–1545.

Pedersen, M., Nalpantidis, L., Andersen, R., Schou, C., Bogh, S., Kruger, V., Madsen, O. (2016). Robot skills for manufacturing: from concept to industrial deployment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37, 282-291.

Peffers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. (2007). A Design Science Research Methodology for Informatioin Systems Research. *Journal of Management Information Systems, 24* (3), 45-77.

Pettersen, J. (2009). Defining lean production: some conceptual and practical issues. *The TQM Journal, 21* (2), 127 - 142.

Piedrahita, A., Gaur, V., Giraldo, J., Cardenas, A., & Rueda, S. (2018). Virtual incident response functions in control systems. *Computer Networks*, 147-159.

Pieska, S., Kaarela, J., & Makela, J. (2018). Simulation and programming experiences of collaborative robots of small-scale manufacturing. *2nd International Symposium on Small-Scale Intelligent Manufacturing Systems, SIMS* (pp. 1 - 4). IEEE.

Pisching, M., Pessoa, M., Junqueira, F., dos Santos Filho, D., & Miyagi, P. (2018). An architecture based on RAMI 4.0 to discover equipment to process operations required by products. *Computers & Industrial Engineering, 125*, 574-591.

Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access*, 3585-3593.

Rauschnabel, P. A. (2021). Augmented reality is eating the real-world! The substitution of physical products by holograms. *International Journal of Information Management, 57*, 1-15.

Rauschnabel, P., He, J., & Ro, Y. (2018). Antecedants to the adoption of augmented reality smart glasses: a closer look at privacy risks. *Journal of Business Research, 92* (11), 374-384.

Raza, M., Malik, A., & Bilberg, A. (2021). PDCA integrated simulations enable effective deployment of collaborative robots: case of a manufacturing SME. *Procedia CIRP, 104*, 1518 - 1522.

Reddy, P., & Suresh, S. (2013). A Review on Importance of Universal Gripper in Industrial Robot Applications. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2* (2), 254-264.

Ries, E. (2011). *The Lean Startup: How todays enterpreneurs use continuous innovation to create radically successful business.* Crown Books.

Rodič, B. (2017). Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm. *Organizacija*, 193-208.

Ross, J., Sebastian, I., Beth, C., Scantlebury, S., Mocker, M., Fonnstad, N., Kagan, M., Moloney, K., Geraghty Krusel, K. (2016). *Designing Digital Organizations.* MIT Center for IS Research.

Roth, B. (1983). *Introduction to Robotics, in Design and Application of Small Standardized Components.* New Hyde Park, New York: Stock Drive Products, Data Book 757.

Roth, N., & Franchetti, M. (2010). Process improvement for printing operations through the DMAIC Lean Six Sigma approach. *International Journal of Lean Six Sigma, 1* (2), 119 - 133.

Rother, M., & Shook, J. (1999). *Learning to see: value stream mapping to add value and eliminate MUDA.* Brookline, MA: The Lean Enterprise Institute.

Saaty, T. (1980). *The Analitic Hierarchy Process.* McGraw-Hill.

Sahoo, A., Singh, N., Shankar, R., & Tiwari, M. (2008). Lean philosophy: implementation in a forging company. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 5*, 451-462.

Salkin, C., Oner, M., Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2018). A conceptual framework for Industry 4.0. In *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation* (pp. 3-23). Springer series in Advanced Manufacturing.

Sanders, A., Elangeswaran, C., & Wulfsberg, J. (2016). Industry 4.0 impliees lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management, 9* (3), 811.

Saucedo-Martinez, J., Perez-Lara, M., & Marmolejo-Saucedo, J. (2017). Industry 4.0 framework for management and operations: a review. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 789-801.

Scheidegger, A., Pereira, T., de Oliveira, M., Banerjee, A., & Montevechi, J. (2018). An introductory guide for hybrid simulation modelers on the primary simulation methods in industrial engineering identified through a systematic review of the literature. *Computers & Industrial Engineering, 124*, 474-492.

Schroeder, A., Ziaee, B. A., Galera, Z. C., & Baines, T. (2019). Capturing the benefits of Indsutry 4.0: a business network perspective. *Prod. Plan. Control*, 1-17.

Senyo, P., Addae, E., & Boateng, R. (2018). Cloud Computing research: A review of research themes, frameworks, methods and future directions. *International Journal of Information Management*, 128-139.

Shah, R., & Ward, P. (2003). Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance. *Journal of Operations Management, 21*, 129 -149.

Shahin, M., Chen, F., Bouzary, H., & Krishnaiyer, K. (2020). Integration of Lean practices and Industry 4.0 technologies: smart manufacturing for next-generation enterprises. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 107* (5-6), 2927-2936.

Shaman, G., & Sanjiv Kumar, J. (2013). A literature review of Lean manufacturing. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 241-249.

Sharma, K. (2017). Management of Industrial Processes. In K. Sharma, *Overview of Industrial Process Automation* (pp. 321-357). Bengaluru, India: Elsevier Inc.

Sharma, M., Kamble, S., Mani, V., Sehrawat, R., Belhadi, A., & Sharma, V. (2021). Industry 4.0 adoption for sustainability in multi-tier manufacturing supply chain in emerging economies. *Journal of Cleaner Production, 281*, 125013.

Shubha, P. (2020). A review of multi object recognition based on deep learning. *International Journal of Engineering Technology Research & Management, 2*, 27-33.

Sikder, A. K., Petracca, G., Aksu, H., Jaeger, T., & Uluagac, S. A. (2018). A Survey on Sensor-based Threats to Internet-of-Things (IoT) Devices and Applications. *arXiv.org*, 1-14.

Singh, B., Garg, S., & Sharma, S. (2011). Value stream mapping: literature review and implications for Indian industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 53*, 799-809.

Singh, G., & Banga, V. (2022). Robots and its types for industrial applications. *Materials today: Proceedings, 60* (3), 1779-1786.

Singh, H. L., Shepherd, L. A., Nurse, J. R., Erola, A., Epiphaniou, G., Maple, C., et al. (2021). Cyber Security in the age of COVID-19: A timeline and analysis of cyber-crime and cyber-attacks during the pandemic. *Computers & Security, 105*.

Singh, L., Bhardwaj, A., & Sachdeva, A. (2009). The impact of quality management tools on performances: An exploratory sturdy on SMEs. *IUP Journal of Operations Management, 8* (3), 61 - 70.

Singh, P., & Singh, H. (2012). Application of Lean Tool (Value Stream Mapping) in Minimisation of the Non-value Added Waste (a Case Study on Tractor Industry). *Mechanical and Aerospace Engineering*, 2062-2066.

Sivarman, P., Nithyanandhan, T., Lakshminarasimhan, S., Manikandan, S., & Saifudheen, M. (2020). Productivity enhancement in engine assembly using lean tools and techniques. *Materials today: Proceedings, 33*, 201-207.

Sommer, L. (2015). Industrial revolution-industry 4.0: Are German-manufacturing SMEs the first victims of this revolution? *Journal of Industrial Engineering and Management, 8* (5), 1512 - 1532.

Stankalla, R., Chromjakova, F., & Koval, O. (2019). A review of the Six Sigma belt system for manufacturing small and medium-sized enterprises. *Quality Management Journal, 26*, 100-117.

Stelian, B., & Eyas, D. (2025). Integrating Lean principles into Lean robotics systems for enhanced production processes. *13* (2), 106.

Stengel, D., Ostermann, B., Bortot, D., Schiller, F., Stursberg, O., Bengler, K., Huelke, M., Som, F., Strunz, U. (2010). An approach for safe and eficient human-robot collaboration. *Proc. 6th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems.*

Steward, J. (2011). *The Toyota Kaizen Continuum: A practical guide to implementing Lean.* Boca Raton, Florida: CRC Press.

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. *International Journal of Production Research, 15* (6), 553-564.

Sull, D. (2004). Disciplined entreprenueurship. *Mit Sloan Management Review, 46*, 71+.

Suri, K., Cuccuru, J., Cadavid, J., Gerard, S., Gaaloul, W., & Tata, S. (2017). Model-based development of modular complex systems for accomplishing system integration for industry 4.0. *5th International Conference on Model-Drivevn Engineering and Software Development*.

Suri, V., Elia, M., & Hillegersberg, v. (2017). Software Bots - The Next Frontier for Shared Services and Functional Exellence. *Global Sourcing of Digital Services: Micro and Macro Perspectives, presented at the International Workshop on Global Sourcing of Information Technology and Business Processes, Springer, Cham*, 81-94.

Tan, W., Cai, W., & Zhang, A. (2020). Structural-aware simulation analysis of supply chain resilience. *International Journal of Production Resources*, 5175-5195.

Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94* (9-12), 3563-3576.

Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 15* (4), 2405-2415.

Tapping, D., & Shuker, T. (2003). *Value Stream Management for the Lean Office: Eight Steps to Planning, Mapping & Susstaining Lean Improvements in Administrative Areas.* New York: CRC Press.

Taylor, F. (1911). *The Principles of Scientific Management.*

Thangarajoo, Y., & Smith, A. (2015). Lean Thinking: An Overview. *Industrial Engineering & Management, 4* (2).

Tortorella, G., & Fettermann, D. (2017). Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. *International Journal of Production Research, 53* (2), 1-13.

Tortorella, G., Silva, E., & Vargas, D. (2018). An empirical analysis of total quality management and total productive maintenance in industry 4.0. *Proceedings of the international conference on industrial engineering and operations management (IEOM)*, (pp. 742-753).

Toynbee, A. (1884). *Lectures on the Industrial Revolution in England.*

Trappey, A., Trappey, C., Govindarajan, U., Chuang, A., & Sun, J. (2017). A review of essntial standards and patent landscapes for the internet of things: a key enabler for industry 4.0. *Advanced Engineering Informatics, 33*, 208-229.

Vinodh, S., Kumar, S., & Vimal, K. (2014). Implementing Lean Sigma in an Indian Rotary Switches Manufacturing Organization. *Production Planning & Control, 25*, 288-302.

vom Brocke, J., Hevner, A., & Maedche, A. (2020). Introduction to Design Science Research. *Cases, Progress in IS*, 1-13.

Wang, L., & Ravani, B. (1988). Dynamic Load Carrying Capacity of Mechanical Manipulators - Part I: Problem Formulation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 110*, 46-52.

Watanabe, T. (2011). Effect of torque-velocity relationship on manipulability for robot manipulators. *Journao of Mechanisms and Robotics, 3* (4), 041007-041009.

Watson, D., & Scheidt, D. (2005). Autonomous Systems. *John Hopkins Apl. Technical Digest , 26* (4), 368-376.

Wessel, G., & Burcher, P. (2004). Six Sigma for small and medium sized enterprises. *The TQM Magazine, 16*, 264 - 272.

White, G., & James, P. (2014). Extension of process mapping to indentify "green waste". *Benchmarking: An International Journal, 21* (5), 835 - 850.

William, R. (2012). *The Most Powerful Idea in the World: A Story of Steam, Industry and Invention.* Chicago: Chicago Press.

Wilson, D. (2014). Arnold Toynbee and the Industrial Revolution: The Science of History. *Political Economy and the Machine Past, 26* (2), 133-161.

Wilson, M. (2015). Industrial Robots. In *Implementation of Robot Systems: an introdustion to Robotics, Automation, and Successful Systems Integration in Manufacturing* (pp. 19-38). Elsevier Inc.

Womack, J., & Jones, D. (1996). *Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation.* New York: Simon and Schuster.

Womack, J., Jones, D., & Roos, D. (1990). *Machine that Changed the World.* Simon and Schuster.

Xiao, W., Yang, J., Fang, H., Zhuang, J., Ku, Y., & Zhang, X. (2020). Developent of an automatic sorting robot for construction and demolition waste. *Clean. Technol. Environ. Policy, 22*, 1829-1841.

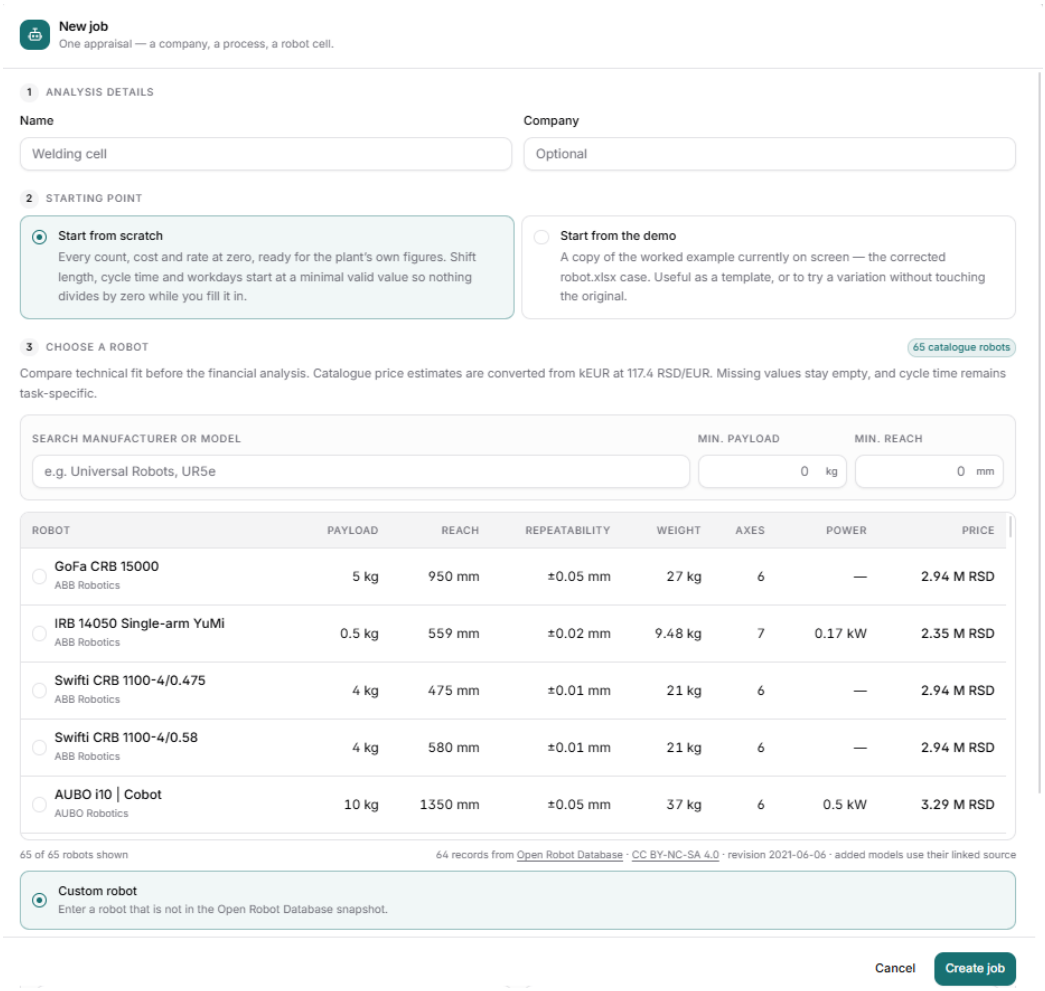
Xie, M. (2003). *Fundamentals of robotics: linking perception to action.* River Edge, NJ: World Scientific Pub.

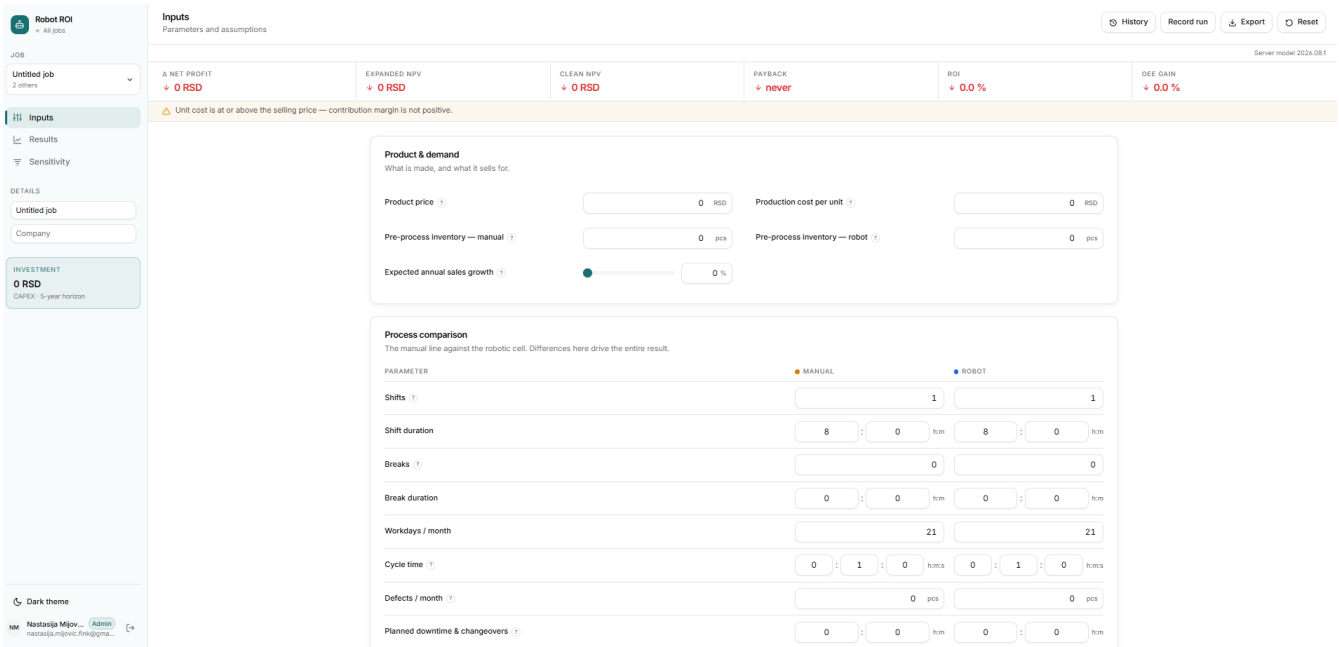
Yang, M., Hong, P., & Modi, S. (2011). Impact of lean manufacturing and environmental management on business performance: An empirical study of manufacturing firms. *International Journal of Production Economics, 129* (2), 251-261.

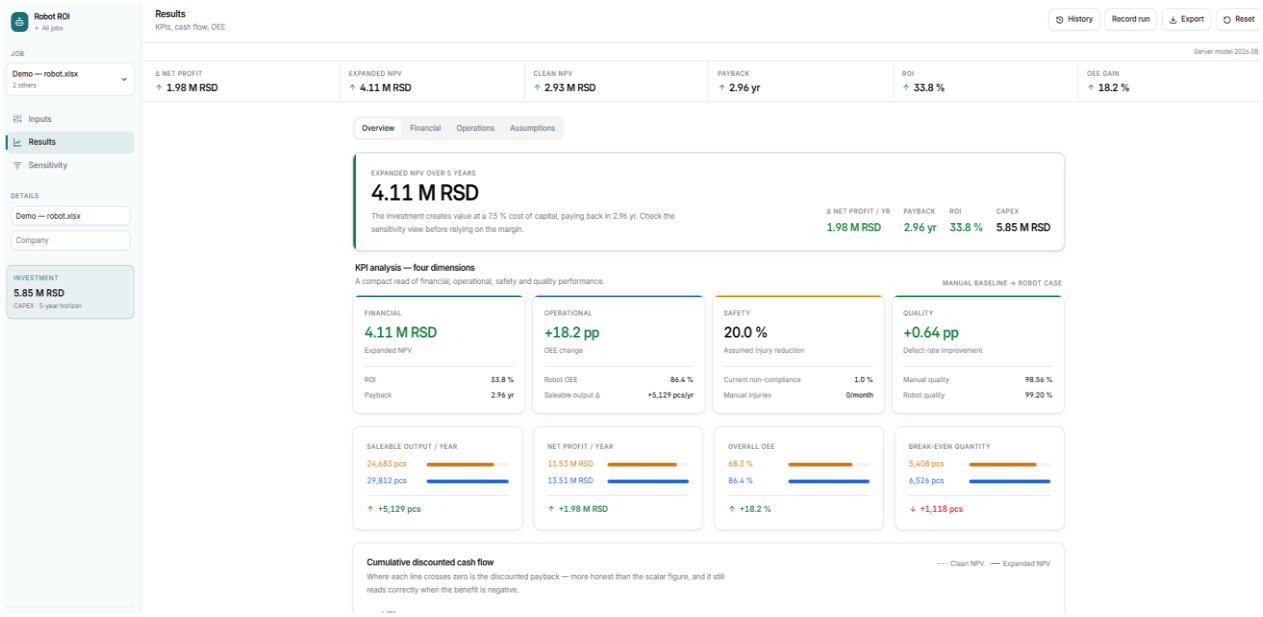
Zhou, B. (2012). Lean principles, practices, and impacts: a study on small and medium-sized enterprises (SMEs). *Annals of Operations Research*, 1 - 18.

Zhou, Z., Li, L., Fursterling, A., Durocher, H., Mouridsen, J., & Zhang, X. (2022). Learning based object detection and localization for a mobile robot manipulator in SME production. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 73*, 102229.

Прилог – Приказ корисничког интерфејса развијеног софтверског решења

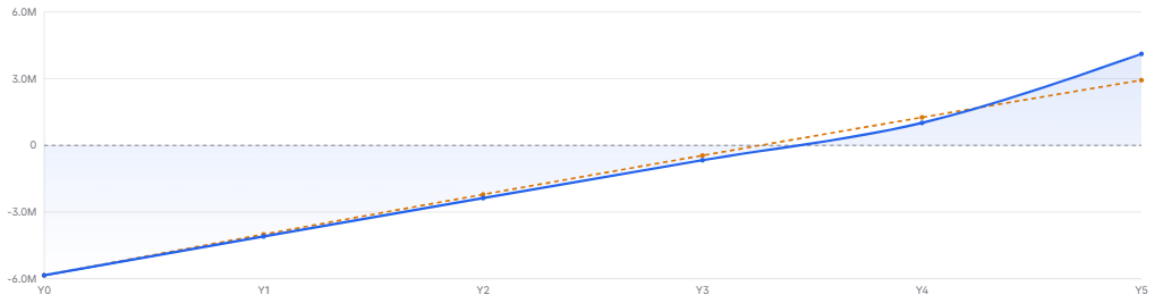






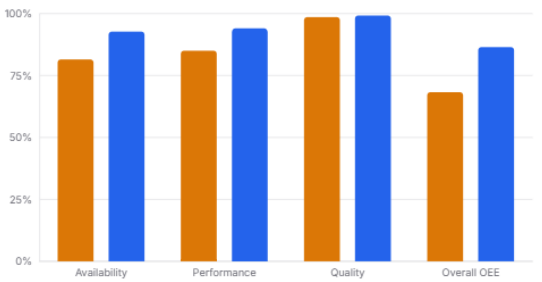
Cumulative discounted cash flow

Where each line crosses zero is the discounted payback — more honest than the scalar figure, and it still reads correctly when the benefit is negative.



OEE decomposition

Availability × Performance × Quality. The quality pair is where the corrected robot defect rate shows up.



Extended economic benefits

Benefits the clean NPV never sees. These are reported here but do not all flow into the expanded NPV — see the M1 assumption.

Labour cost avoided	2,250,000 RSD
Annual turnover cost avoided	461,636 RSD
Sick leave saving	18,182 RSD
Freed labour capacity	3,256 h/yr
Value of freed capacity	1,850,000 RSD
Total	**2,729,818 RSD**

Financial KPIs

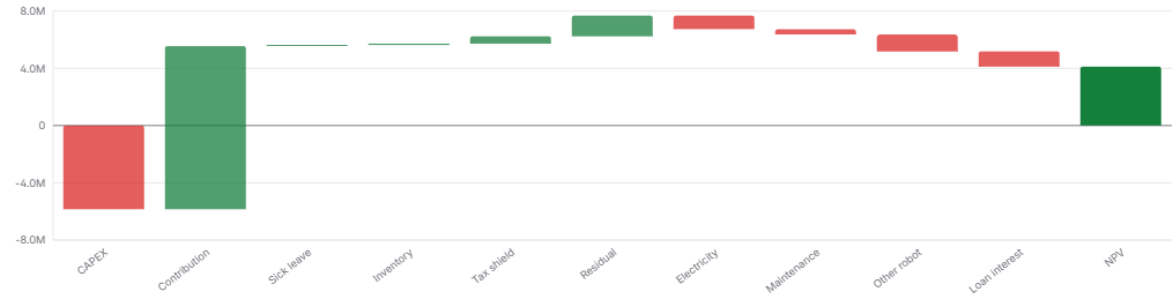
Revenue is earned on saleable units only; material is charged on every unit produced, so scrap costs both the sale and the input.

Annual sales revenue — manual	33,322,696 RSD
Annual sales revenue — robot	40,246,435 RSD
Annual sales costs — manual	21,787,826 RSD
Annual sales costs — robot	26,734,602 RSD
Revenue lost to scrap — manual	-486,000 RSD
Revenue lost to scrap — robot	-324,000 RSD
Net profit — manual	11,534,870 RSD
Net profit — robot	13,511,833 RSD
Δ Net profit	**1,976,963 RSD**

Return on investment	33.8 %
Payback period	2.96 yr
Investment efficiency index	0.2314
Clean NPV	2,930,906 RSD
Expanded NPV	**4,114,163 RSD**
Extended economic benefits	2,729,818 RSD
WACC	7.5 %

Where the expanded NPV comes from

Each bar is the present value of one line over the whole horizon. This is what the expanded method adds — the clean NPV sees only the first and last bars.



LINE	YEAR 1	YEAR 2	YEAR 3	YEAR 4	YEAR 5
Contribution margin	2.57 M RSD	2.69 M RSD	2.83 M RSD	2.97 M RSD	3.12 M RSD
Sick leave savings	18,182 RSD	19,091 RSD	20,045 RSD	21,048 RSD	22,100 RSD
Inventory savings	21,750 RSD	22,838 RSD	23,979 RSD	25,178 RSD	26,437 RSD
Tax shield	125,406 RSD	125,406 RSD	125,406 RSD	125,406 RSD	125,406 RSD
Residual value (final year only)	3.85 M RSD	3.30 M RSD	2.83 M RSD	2.43 M RSD	2.08 M RSD
Total inflows	**2.73 M RSD**	**2.86 M RSD**	**3.00 M RSD**	**3.14 M RSD**	**5.37 M RSD**
Electricity	212,890 RSD	223,534 RSD	234,711 RSD	246,446 RSD	258,769 RSD
Maintenance	84,000 RSD	88,200 RSD	92,610 RSD	97,241 RSD	102,103 RSD
Other robot costs	292,321 RSD	292,321 RSD	292,321 RSD	292,321 RSD	292,321 RSD
Loan interest	263,089 RSD	263,089 RSD	263,089 RSD	263,089 RSD	263,089 RSD
Total outflows	**852,300 RSD**	**867,144 RSD**	**882,731 RSD**	**899,097 RSD**	**916,281 RSD**

Break-even

Revenue against total cost, per unit produced. The revenue lines differ because scrap earns nothing: 1,330.59 RSD per unit made on the manual line against 1,339.22 RSD on the robot.



METRIC

Expanded NPV | **Clean NPV** | Δ Net profit | Payback period

VARIATION

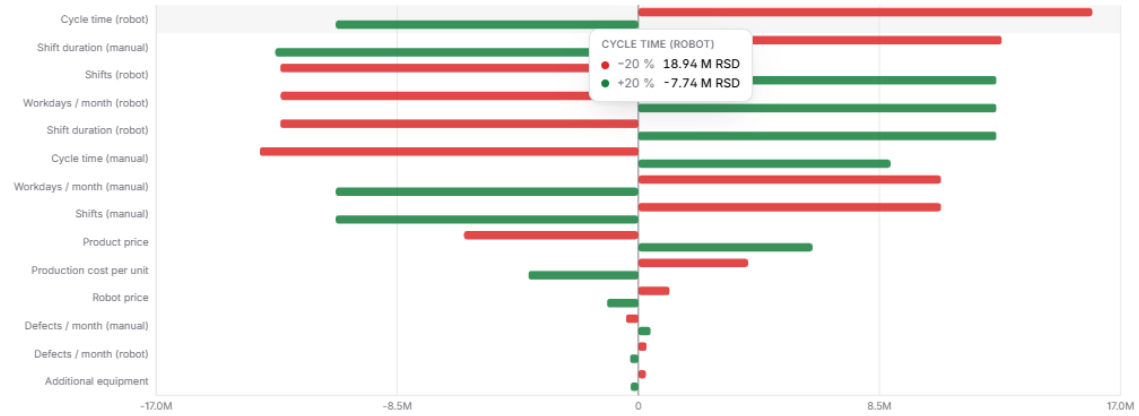
±10% | **±20%** | ±30% | ±50%

BASE CASE

2.93 M RSD

What moves Clean NPV

Each input varied ±20 % with all else held fixed, sorted by the size of the swing. Bars are shown relative to the base case of 2.93 M RSD.



Effect of Cycle time (robot) on Clean NPV

The horizontal axis changes only Cycle time (robot); the vertical axis shows Clean NPV. The dotted line marks the current input (0:08:26). Clean NPV reaches zero at 0:08:50.

How to read this chart

HORIZONTAL AXIS	VERTICAL AXIS	VERTICAL DOTTED LINE	HORIZONTAL DOTTED LINE
Tested values of Cycle time (robot); lower on the left, higher on the right.	The resulting Clean NPV. All other inputs stay unchanged.	The current input: 0:08:26.	Zero for Clean NPV; crossing it changes the result's sign.



Full sensitivity table

Copy straight into the thesis. Swing is the absolute difference between the low and high cases.

22 inputs · model 2026.08.1

INPUT	BASE	−20%	+20%	SWING	SHARE
Cycle time (robot)	8.43	18.94 M RSD	-7.74 M RSD	**26.69 M RSD**	910 %
Shift duration (manual)	480	15.74 M RSD	-9.88 M RSD	**25.62 M RSD**	874 %
Shifts (robot)	2	-9.69 M RSD	15.55 M RSD	**25.24 M RSD**	861 %
Workdays / month (robot)	22	-9.69 M RSD	15.55 M RSD	**25.24 M RSD**	861 %

Биографија

Настасија Николић рођена је 29. децембра 1994. године у Крагујевцу. Основне академске студије завршила је на Факултету организационих наука Универзитета у Београду, на студијском програму Менаџмент и организација, са просечном оценом 9,47. Завршни рад под насловом „Специфичности рачуноводственог третмана финансијских пласмана“ одбранила је оценом 10. Последњи семестар основних студија завршила је у Литванији, на Економском факултету у Вилњусу, у оквиру Erasmus+ програма студентске размене.

Мастер академске студије завршила је на Факултету организационих наука Универзитета у Београду, на студијском програму Пословна аналитика – пословна статистика, са просечном оценом 10. Мастер рад под насловом „Примена мултиваријационе анализе у предвиђању понашања потрошача“ одбранила је оценом 10.

Докторске академске студије уписала је 2018. године на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, на студијском програму Индустријско инжењерство и инжењерски менаџмент, на којима је положила све испите са просечном оценом 10. Њена истраживачка интересовања усмерена су на Lean индустријске системе, напредна роботска решења и примену аналитичких метода у унапређењу производних процеса.

Након стицања дипломе започела је професионалну каријеру у компанији Mercator, а од 2019. године ангажована је на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, најпре у звању истраживача-приправника, а од 2023. године у звању истраживача-сарадника. Учествовала је у реализацији више научноистраживачких пројеката. Ауторка је и коауторка више научних радова објављених у домаћим и међународним часописима и зборницима научних конференција, као и коауторка уџбеника „Управљање софтверским пројектима“ и практикума „Основи предузетничког менаџмента и економије“.

Образац 1

ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Изјављујем да докторска дисертација под насловом:

"Развој модела за унапређење *Lean* индустријских система применом напредних роботских решења "

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, 2026. године,

потпис аутора

Образац 2

ИЗЈАВА АУТОРА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Изјављујем да су штампана и електронска верзија докторске дисертације под насловом:

"Развој модела за унапређење *Lean* индустријских система применом напредних роботских решења"

истоветне.

У Крагујевцу, 2026. године,

потпис аутора

Образац 3

ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Настасија Николић,

[x] дозвољавам

[ ] не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

"Развој модела за унапређење *Lean* индустријских система применом напредних роботских решења"

и то у целини, као и да по један примерак тако умножене докторске дисертације учини трајнодоступним 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

[x] дозвољавам

[ ] не дозвољавам[1]

припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од следећих *Creative Commons* лиценци:

[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.

1) Ауторство

2) Ауторство - делити под истим условима

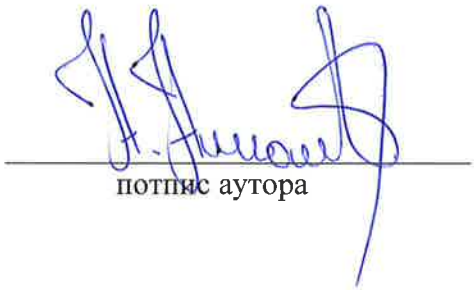
3) Ауторство - без прерада

4) Ауторство - некомерцијално

5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима

6) Ауторство - некомерцијално - без прерада[2]

У Крагујевцу, 2026. године,



потпис аутора

[2]Молимо ауторе који су изабрали дадозволе 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/