



**УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ**

**Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу**

**Арсо М. Вукићевић**

**Унапређење перформанси процеса у LEAN  
индустријским системима применом  
технолошких пиlara Индустије 4.0**

**Докторска дисертација**

**Крагујевац, 2020.**



**УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ**

**Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу**

**Арсо М. Вукићевић**

**Унапређење перформанси процеса у LEAN  
индустријским системима применом  
технолошких пиlara Индустрије 4.0**

**Докторска дисертација**

**Крагујевац, 2020.**



**UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC**  
**Faculty of engineering University of Kragujevac**

**Arso M. Vukićević**

**Improving process performance in LEAN industrial  
systems by using Industry 4.0 technological pillars**

**Doctoral disertation**

**Kragujevac, 2020.**

Идентификациона страница докторске дисертације

<b>Аутор</b>
Име и презиме: Арсо М. Вукићевић
Датум и место рођења: 16. 06. 1987. Никшић, Црна Гора, С.Ф.Р.Ј.
Садашње запослење: Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
<b>Докторска дисертација</b>
Наслов: Унапређење перформанси процеса у LEAN индустријским системима применом технолошких пиlara Индустије 4.0
Број страница: 123
Број слика: 78
Број библиографских података: 119
Установа и место где је рад израђен: Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Научне области (УДК): Индустијско инжењерство, Безбедност на раду, контрола квалитета, Информациони инжењеринг; 007.51:331.45(043.3), 005.6:681.3.06(0.43.3), 681.3:658.56(0.43.3)
Ментор: др Иван Мачужић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
<b>Оцена и одбрана</b>
Датум пријаве теме: 12. 03. 2019. (01-1/948)
Број одлуке и датум приhvатања теме докторске дисертације: 10. 07. 2019. (IV-04-579/10)
Комисија за оцену научне заснованости и испуњености услова кандидата: 1. Др Петар Тодоровић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2. Др Иван Луковић, редовни професор, Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду 3. Др Миладин Стефановић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу 4. Др Иван Мачужић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу 5. Др Милан Ерић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Комисија за одбрану докторске дисертације: 1. Др Милош Миловановић, ванредни професор, Факултет организационих наука Универзитета у Београду 2. Др Миладин Стефановић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу 3. Др Марко Ђапан, доцент, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Датум одбране докторске дисертације:



## Doctoral dissertation identification page

<b>Author</b>
Name and surname: Arso M. Vukićević
Date and place of birth: 16. 06. 1987. Nikšić, Montenegro, S.F.R.J.
Current employment: Faculty of engineering, University of Kragujevac
<b>Doctoral disertation</b>
Title: Improving process performance in LEAN industrial systems by using Industry 4.0 technological pilars
No. of pages: 123
No. of images: 78
No. of bibliographic data: 119
Institution and place of work: Faculty of engineering, University of Kragujevac
Scientific area (UDK): Industrial engineering, Occupational health and safety, Quality control, Information engineering; 007.51:331.45(043.3), 005.6:681.3.06(0.43.3), 681.3:658.56(0.43.3)
Mentor: PhD Ivan Mačuzić, Associate professor, Faculty of engineering, University of Kragujevac
<b>Grade and disertation Defense</b>
Topic Application Date: 12. 03. 2019. (01-1/948)
Decision number and date of acceptance of the doctoral disertation topic: 10. 07. 2019. (IV-04-579/10)
Commission for evaluation of the scientific merit of the topic and the eligibility of the candidate:
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. PhD Petar Todorović, Full professor, Faculty of engineering, University of Kragujevac</li> <li>2. PhD Ivan Luković, Full professor, Faculty of technical sciences, University of Novi Sad</li> <li>3. PhD Miladin Stevanović, Full professor, Faculty of engineering, University of Kragujevac</li> <li>4. PhD Ivan Mačuzić, Associate profesor, Faculty of engineering, University of Kragujevac</li> <li>5. PhD Milan Erić, Full professor, Faculty of engineering, University of Kragujevac</li> </ol>
Commision for evaluation and defense of doctoral disertation:
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. PhD Miloš Milovanović, Associate professor, Faculty of Organizational Sciences, University of Belgrade</li> <li>2. PhD Miladin Stevanović, Full professor, Faculty of engineering, University of Kragujevac</li> <li>3. PhD Marko Đapan, Assisstant professor, Faculty of engineering, University of Kragujevac</li> </ol>
Date of Dissertation Defense:

## Апстракт

Термин Индустрија 4.0 (И4.0) означава трансформацију глобалне привреде под утицајем технолошких достигнућа XXI века. У оквиру ове дисертације анализирани су могућности примене технолошких пилаара И4.0 за решавање репрезентативних проблема (модел зона) у LEAN индустријским системима. У првој студији предложен је оквир за управљање небезбедним условима и небезбедним поступцима применом мобилних и интернет технологија. Такође, извршена је анализа захтева и предложено је решење прилагођено за мала и средња предузећа. У другој студији случаја предложено је решење за унапређење димензионе контроле екструдованих гумених профила. Решење је базирано на употреби дигиталне камере и алгоритама компјутерске геометрије и обраде слика – чиме је постигнуто је побољшање перформанси оператера од ~6%. У трећој студији случаја предложен је систем за попис материјала који се транспортују на палетама у штампарској индустрији. Дигитализовани попис показао се као неупоредиво бржи и поузданији од тренутног-ручног пописа складишта. У четвртој студији случаја предложено је решење за анализу неергономског транспорта терета ручним колицима. Употребом IoT модула детектују се повећане вредности силе којом радник делује, што омогућава анализу одговарајућих фрејмова снимљених интернет камером. Идентификацијом критичних момената, у којима алгоритми дубоког учења омогућавају тродимензионални приказ положаја тела оператера, омогућена је прецизнија анализа ергономских ризика. Валидација предложених алгоритама и решења указује на велики потенцијал за њихову ширу практичну примену. Закључено је да постоји велики број специфичних проблема у индустрији који захтевају *наменска* решења – што отвара велике могућности за даља истраживања и развој дигитализованих решења базираних на пилаарима И4.0.

**Кључне речи** — Индустрија 4.0, Безбедност и здравље на раду, Контрола квалитета, Логистика, Машинска визија, Интернет ствари.

**Abstract**

The term Industry 4.0 (I4.0) refers to the transformation of the global economy under the technological advances of XXI century. The aim of this dissertation was to assess possibilities for applying I4.0 technological pillars for solving various representative problems (model zones) of LEAN industrial systems. In the first case study, a framework for managing unsafe conditions and unsafe acts by using mobile and internet technologies was proposed. Moreover, an analysis of requirements and adaptation of the proposed solution for use in small and medium enterprises was performed. In the second case study, a solution for the dimensional inspection of extruded rubber profiles was proposed. The solution is based on the use of a digital camera and algorithms for computational geometry and image processing – which improved operators' performances by ~ 6%. In the third case study, the system for the inventory of materials that are transported on pallets in the printing industry was proposed. The digitized inventory has shown as significantly faster and robust compared to the current-manual inventory practice. In the fourth case study, a solution for the detection and analysis of non-ergonomic cargo transport by handcart was proposed. By using an IoT module, increased values of the force exerted by the worker were detected, which enabled the analysis of corresponding frames acquired by the IP camera. Identification of critical moments, by using Deep learning algorithms for three-dimensional assessment of the operator's body pose, enables a more precise analysis of ergonomic risks. Validation of developed algorithms and solutions indicated a high potential for wider applications. It was concluded that there are a number of specific problems in the industry that require dedicated solutions - which opens up opportunities for further research and development of digitalized solutions based on the I4.0 pillars.

**Keywords** — Industry 4.0, Occupational health and safety, Quality control, Logistics, Machine vision, Internet of Things.

## Садржај

<b>Списак слика</b> .....	<b>i</b>
<b>Списак табела</b> .....	<b>iv</b>
<b>1. Уводна разматрања и преглед садржаја дисертације</b> .....	<b>1</b>
1.1. Предмет рада.....	1
1.2. Научни циљ рада .....	2
1.3. Хипотезе .....	3
1.4. Преглед садржаја и организација дисертације .....	4
1.5. Преглед метода које су коришћене током истраживања .....	5
<b>2. Индустрија 4.0</b> .....	<b>6</b>
2.1. Појам „Индустријска револуција“ .....	6
2.2. Технолошки пилари Индустрије 4.0.....	8
2.3. Могућности примене технолошких пилара И4.0 у LEAN индустријским системима .....	11
<b>3. Управљање извештајима о небезбедним условима и     небезбедним поступцима</b> .....	<b>14</b>
3.1. Безбедност и здравље на раду .....	14
3.1.1 Пирамида безбедности.....	14
3.1.2 Небезбедни услови и небезбедни поступци .....	15
3.2. Претходна истраживања и изазови у управљању БЗР и НУ/НП.....	16
3.2.1 Преглед актуелних софтверских решења за дати проблем.....	18
3.3. Циљ и постављени задаци студије.....	18
3.3.1 Кратак опис корисника и њихове интеракције са системом.....	19
3.4. Концепт БЗР 4.0 у LEAN предузећу.....	20
3.4.1 Софтверска архитектура и актуелне технологије за њену имплементацију .....	21
3.4.2 Ток употребе предложеног оквира .....	23
3.4.3 Функционалности и кориснички интерфејс .....	24
3.4.4 Групе активности за имплементацију предложеног решења.....	25
3.4.5 Очекивани бенефити.....	27
3.4.6 План реализације.....	28
3.4.7 Управљање потенцијалним ризицима.....	28

3.5. Случај употребе: енгл. SafE-Tag апликације за дигитално прикупљање и обраду извештаја о небезбедним условима и небезбедним поступцима .....	29
3.5.1 Дијаграм релација међу ентитетима.....	31
3.5.2 Дијаграм активности.....	31
3.5.3 Прилагођена софтверска архитектура и предложеног решења.....	32
3.5.4 Node.JS веб-сервиси.....	34
3.5.5 MongoDB NoSQL база података у облаку .....	35
3.5.6 React Native корисничка апликација .....	35
3.6. Дискусија трећег поглавља.....	37
3.6.1 Корисност и значај проактивне идентификације НУ/НП употребом мобилних уређаја .....	37
3.6.2 Флексибилност и изводљивост решења базираног на JavaScript технологијама.....	37
3.6.3 Даља аутоматизација и укључивање пословне интелигенције у оквир.....	38
3.6.4 Закључак трећег поглавља .....	38
<b>4. Димензиона контрола екструдованих гумених профила .....</b>	<b>40</b>
4.1. Дигитализација фабрика, значај и повезаност са разматраним проблемом.....	40
4.2. Тренутна пракса инспекције екструдованих гумених профила .....	40
4.2.1 Профил и носач разматраног профила.....	43
4.2.2 Потребне индустријске праксе и недостаци тренутне-мануелне инспекције .....	44
4.3. Преглед приступа за димензиону анализу производа .....	45
4.4. Преглед научне литературе .....	48
4.5. Преглед предложеног решења .....	51
4.5.1 Аквизиција слике.....	52
4.5.2 Калибрација система.....	52
4.5.3 Одређивање контуре профила.....	54
4.5.4 Рачунарски подржана контрола.....	55
4.5.5 Аугментација техничког цртежа употребом ко-регистрованих референтних тачки.....	57
4.5.6 Функционалности за додатно олакшање рада корисника и опис развијеног корисничког интерфејса.....	59

4.5.7	Адаптација изложене процедуре за контролу профила произвољног облика.....	62
4.6.	Добијени резултати .....	63
4.7.	Дискусија четвртог поглавља.....	64
4.7.1	Допринос у односу на претходне студије.....	65
4.8.	Могућности потпуне аутоматизације.....	66
4.8.1	Смернице за будући рад .....	66
4.9.	Закључак четвртог поглавља.....	67
<b>5.</b>	<b>Управљање палетама применом машинске визије, QR кодова и веб камера .....</b>	<b>68</b>
5.1.	Концепт предложеног решења.....	68
5.2.	Управљање палетама – тренутна пракса и недостаци.....	69
5.2.1	Дефиниција захтева.....	70
5.3.	Преглед комерцијалних решења доступних на тржишту .....	70
5.3.1	Преглед примена QR кода у логистици и генерално у производној индустрији .....	71
5.3.2	Принцип рада и врсте баркодва и QR-кодова .....	72
5.4.	Опис предложеног решења .....	74
5.4.1	Кориснички интерфејс.....	75
5.4.2	Аутоматско генерисање извештаја о складишту .....	79
5.4.3	Приказ имплементираног решења.....	80
5.4.4	Дискусија и анализа предложеног решења.....	81
<b>6.</b>	<b>Препознавање небезбедних поступака код радних места која укључују задатке гурања и повлачења терета .....</b>	<b>82</b>
6.1.	Ергономски ризици при гурању и повлачењу терета.....	83
6.1.1	Ризици од МКП везани за ергономију радног места .....	83
6.1.2	Ризици од повреда повезани са индивидуалним факторима .....	84
6.2.	Преглед научне литературе и метода за детекцију и превенцију неергономских поступака на радним местима која подразумевају гурање и повлачење терета .....	85
6.3.	Преглед предложеног решења .....	88
6.3.1	Мерење силе гурања и повлачења .....	89
6.3.2	Тродимензионална реконструкција тела човека на основу монокуларних слика .....	91

---

6.3.3	VIBE алгоритам .....	93
6.3.4	Ергономски параметри положаја тела радника.....	96
6.4.	Добијени резултати .....	97
6.4.1	Евалуација у лабораторијским условима.....	97
6.5.	Дискусија резултата .....	107
6.6.	Закључци шестог поглавља и смернице за даља истраживања .....	109
<b>7.</b>	<b>Закључна разматрања и смернице за будућа истраживања .....</b>	<b>110</b>
	<b>Литература.....</b>	<b>114</b>

## Списак слика

- Слика 2.1** Четири индустријске револуције.
- Слика 2.2** Концепт примене пилара Индустрије 4.0.
- Слика 2.3** Интернет ствари.
- Слика 2.4** Идустријске интернет ствари.
- Слика 2.5** Примери употребе AR у индустријском окружењу.
- Слика 2.6** Пример симулације дигиталне фабрике.
- Слика 3.1** Пирамида безбедности.
- Слика 3.2** Пример небезбедних услова, небезбедних поступака и њихових последица.
- Слика 3.3** Преглед-концепт предложеног решења.
- Слика 3.4** Генеричка софтверска архитектура БЗР 4.0 решења.
- Слика 3.5** Дијаграм тока са илустрацијом основних функционалности и корисника система.
- Слика 3.6** Изглед корисничког интерфејса-функционалности за извештавање о НУ и НП. Корисник треба да наведе локацију, врсту, опис и приоритет пријављеног НУ/НП.
- Слика 3.7** Енгл. UML Use case дијаграм прилагођене Safe-Tag апликације.
- Слика 3.8** „Моск-ир“ корисничког интрефејса за управљање извештајима (у Менаџер моду рада).
- Слика 3.9** Дијаграм релација ентитета у апликацији.
- Слика 3.10** Енгл. UML Acitivity diagram – Дијаграм активности.
- Слика 3.11** Прилагођена архитектура (са акцентом на илустрацију предности-својстава коришћених технологија).
- Слика 4.1** Визуелна инспекција гумених профила помоћу профил-пројектора. а) Изглед уређаја; б) Изглед металног носача; в) Изглед пројектоване сенке (силуете гуменог профила) на техничком цртежу одштампаном на паус папиру.
- Слика 4.2** Инспекција базе, врата и пера разматраног U-профила се изводи померањем и позиционирањем паус папира на сенку-силуету коју прави профил пројектор.
- Слика 4.3** Пример попуњеног извештаја контроле квалитета.
- Слика 4.4** Димензије гуменог профила и његовог металног носача (црвена боја).
- Слика 4.5** Технички цртеж са назначеним толеранцијама. Приказани цртеж се штампна на паус папир, који се користи приликом димензионе контроле на профил пројектору.
- Слика 4.6** Пример оптичких уређаја.
- Слика 4.7** Мерни систем базиран на структурном светлу (слика лево) и уређај Atos (Gom) који се широко користи у аутомобилској индустрији.
- Слика 4.8** Кориснички интерфејс у раду Liguori et al. 2001.
- Слика 4.9** Приказ резултата изложених у раду Perlo et al. 2016.
- Слика 4.10** Изглед корисничког интерфејса приказаног у раду Karunasena и Wickramarachchi 2010.
- Слика 4.11** Изглед корисничког интерфејса приказаног у раду Anchini et al. 2009.
- Слика 4.12** Димензиона контрола екструдованих гумених профила. а) Саставни делови разматраног профила; б) Гумени профил монтиран на металном носачу; в) Део техничког цртежа са фокусом на толеранције које је потребно проверити; г) Профил пројектор; д) Ручна контрола димензија; њ) Преглед специфичних делова померањем техничког цртежа преко пројектоване силуете профила.
- Слика 4.13** Концепт решења за димензиону контролу екструдованих гумених профила.



- Слика 4.14** Носач профила и калибрација система. а) Димензије носача од плексигласа; б) Детектовање црвених калибрационих кругова; в) Откривање калибрационих кругова помоћу Хофове-ове трансформације; г) Резултати калибрације.
- Слика 4.15** Детектовање контуре гуменог профила. а) Улазна слика; б) Слика након првог корака уклањања позадине (обратити пажњу на регионе-шумове које је потребно неутралисати бројењем њихових пиксела); в) Коначни изглед филтриране слике и детектоване контуре (плава боја).
- Слика 4.16** Приказ детектоване контуре профила. На слици десно се види да метода разликује пикселе који се налазе на ивици профила (сива боја).
- Слика 4.17** Корегистрација оријентирних-референтних тачки. а) Сегментирани профил; б) Еродирана слика сегментираног профила (после 20 итерација); в) Еродирана слика - коначна скелетонизирана слика; г) Скелетонизирана слика након конволуције са јединичним оператором  $3 \times 3$ ; д) Бифуркацијске тачке након савијања; њ) Оријентирне тачке на референтном техничком цртежу са приказом контекста облика на тачки Е; е) Оријентирне тачке на прегледаном профилу; ж-к) Контексти облика израчунати за различите оријентационе тачке: ж) Тачка А из референтног цртежа; з) Тачка А са прегледаног профила; и) Тачка Б са прегледаног профила; ц) тачка Ц са прегледаног профила; к) Тачка Е од прегледаног профила.
- Слика 4.18** Аугментација техничког цртежа преко корегистрованих референтних тачака. а) Почетна аугментација након калибрације система; б-г) Аугментација помоћу алгорита итеративног налажења најближе тачке (наранџаста боја означава облак тачака изабран за аугментацију); д) Скица предефинисаних области које је потребно визуелно преконтролисати; њ-ј) Преклапање техничког цртежа преко предефинисаних подручја (на слици се може видети како је врат савијен, што захтева додатну интеракцију корисника); з-ј) Инспекција левог врата коришћењем функције локалног поравнања.
- Слика 4.19** Демонстративни кориснички интерфејс са анотацијама које указују на основне функционалности развијене у овом раду.
- Слика 4.20** Процедура за рачунање тачки скелетона бинарне маске.
- Слика 4.21** Алгоритам за рачунање дебљине профила.
- Слика 4.22** Почетна бинарна маска, међурезултати ерозије и финални резултати одређивања скелетона бинарне маске.
- Слика 4.23** Одређивање дебљине профила. а) Матрица са вредностима пиксела при пропагацији од централне линије ка ивицама профила; б) Поглед на цео профил; в) Поглед на специфични део (перце) профила.
- Слика 4.24** Прилагођавање предложеног поступка за инспекцију произвољног профила. (а) Референтни облици профила дефинисани техничким цртежима; (б) Контуре и референтне тачке извађене из техничких цртежа; (в) Сlike контролисаних профила направљене опремом описаном у одељку 4.5.1; (г) Контуре и кандидати за референтне тачке извађене из детектованих централних линија профила; (д-ђ) Преклапање референтних техничких цртежа на регионима дефинисаним са тачкама А и В са слике 4.24-б.
- Слика 5.1** Концепт и елементи дигиталног складишта палета.
- Слика 5.2** Изглед материјала на палетама у разматраном радном простору.
- Слика 5.3** Изглед Cognex решења. а) Cognex DataMap читача који су фиксирани на локацији складиштења палета. б) Изглед читача постављеног на виљушкар. Слика је преузета са официјалног сајта компаније Cognex.

**Слика 5.4** *Енгл. Universal Product Code (UPC) је најчешће коришћени пример 1D кода у радњама и маркетима.*

**Слика 5.5** *Принцип рада QR кода.*

**Слика 5.6** *Коришћене технологије и дијаграм тока. а) Архитектура и технологије коришћене за развој апликације; б) Упрошћени дијаграм тока решења.*

**Слика 5.7** *Приказ корисничког интерфејса са назначеним главним елементима – деловима радног прозора.*

**Слика 5.8** *Приказ свих табака детектованих на једној камери.*

**Слика 5.9** *Приказ позиције једног-траженог табака на камери.*

**Слика 5.10** *Приказ корисничког интерфејса радних менија са пратећим функционалностима.*

**Слика 5.11** *Пример аутоматски генерисаног извештаја (у лабораторијским условима).*

**Слика 5.12** *Изглед имплементираног решења (мини-серверска станица повезана са IP камерама, монитор великих димензија тако да се види са удаљености у производном погону, и десно – штампач QR кодова са енгл. Touch pad тастатуром).*

**Слика 5.13** *Приказ рада софтвера. На слици је приказан тренутак када корисник жели да лоцира табак „0002,01/3“ на складишту.*

**Слика 5.14** *Приказ QR кода позиционираног на палети и корисничког интерфејса.*

**Слика 6.1** *Фактори који утичу на настајање мишићно-коштаних повреда на раду.*

**Слика 6.2** *Пример ергономских ризика у пракси.*

**Слика 6.3** *Графичка илустрација процеса настајања и прогреса мишићно-коштаних повреда на послу. Настајење МКП треба схватити као процес „замора материјала“.*

**Слика 6.4** *Делови тела и углови разматрани у раду Keyserling W.M. et al. 1993.*

**Слика 6.5** *Делови тела и углови разматрани у раду Keyserling W.M. et al. 1993.*

**Слика 6.6** *Технички цртеж колица коришћених у експерименталне сврхе (Giagloglou E. et al. 2015).*

**Слика 6.7** *Изглед колица са мерном опремом у лабораторији (1-тегови, 2-рачунар, 3-мерни инструмент са Wi-Fi конекцијом, 4,5-сензор силе, 6-сензор положаја ручке).*

**Слика 6.8** *VIBE архитектура (скраћенице и називи саставних блокова су на енглеском зато што су то стандардне термини у литератури).*

**Слика 6.9** *Илустрација енгл. SMPPL модела људског тела. а) Силуета (каква се види након сегментације особе на слици); б) Површински модел; в) Чворови; г) Тространа (енгл. STL) мрежа; д и љ) Приказ нивоа детаља и квалитета мреже на појединим деловима тела.*

**Слика 6.10** *Илустративни приказ резултира (лево) за улазну слику (десно).*

**Слика 6.11** *Параметри положаја људског тела који се посматрају као ергономски индикатори.*

**Слика 6.12** *Скица путање која укључује активности гурања и повлачења колица.*

**Слика 6.13** *Изглед радног простора са путањама назначеним жутиим тракама.*

**Слика 6.14** *Измерене вредности силе на сва четири сензора.*

**Слика 6.15** *Приказ положаја тела у карактеристичним моментима (Т).*

**Слика 6.16** *Параметри положаја тела у фази гурања колица од складишта 1 до складишта 2 (путања 0-1-2-3-4-5-6).*

**Слика 6.17** *Параметри положаја тела у фази гурања колица од складишта 1 до складишта 2 (путања 4-3-0).*

**Слика 6.18** *Измерене вредности силе на сва четири сензора.*

**Слика 6.19** *Приказ положаја тела у карактеристичним моментима (Т).*

*Слика 6.20* Вредности параметара положаја тела током транспорта терета колицима.

*Слика 6.21* Приказ положаја тела у детектованим екстремним тачкама на дијаграму са слике 6.22.

*Слика 6.22* Вредности параметара положаја тела током транспорта терета колицима.

*Слика 7.1* Паметни градови и паметне фабрике – Индустрија 4.0 (слика преузета са сајта <https://www.nvidia.com>).

## Списак табела

*Табела 2.1* Компаративни приказ технолошких аспеката четири индустријске револуције (Тоунбеџ А. 1884; Мокур Ј. 2001; Вилсон Д. 2014; Мокур Ј. 2018; Нуволари А. 2019).

*Табела 3.1* Гантограм планираних активности.

*Табела 4.1* Перформансе мануелне и предложене (полуаутоматске) димензионе контроле гумених профила.

*Табела 5.1* Приказ различитих дводимензионалних кодова који су у употреби у пракси (подаци су преузети из документације компаније Denso Wave).

# 1. Уводна разматрања и преглед садржаја дисертације

## 1.1. Предмет рада

Иако не постоји стриктна дефиниција појма Индустрија 4.0 (И4.0), термин И4.0 се у ширем смислу односи на усавршавање и трансформацију глобалне привреде под утицајем технолошких достигнућа XXI века. У последњих пет година, главне покретачке снаге И4.0 су дигитализација, вештачка интелигенција (енгл. Artificial Intelligence – AI) и интернет ствари (енгл. Internet of things – IoT) – или, технологије које уређаје и процесе у данашњим компанијама чине све више аутоматизованим, паметним и повезаним. Поред чињенице да је највећи напредак направљен у области аутоматизације производње, познато је да ће прелазак индустрије на парадигму И4.0 променити и начин на који компаније обављају остале пословне активности. Имајући то у виду, као и комплексност и брзину технолошког развоја у XXI веку, прецизније је говорити о гранама И4.0, као што су: Квалитет 4.0 (Gunasekaran A. et al. 2019), Одржавање 4.0 (Kans M. et al. 2016), Сигурност 4.0 (Badri A. et al. 2018), Оператор 4.0 (Romero D. et al. 2018), Логистика 4.0 итд. У језгру свих огранака И4.0 јесте адаптација иновативних технологија, тј. информационих и комуникационих (енгл. Information and Communication Technologies – ICT, срп. ИКТ) (Xu L. et al. 2018), кроз: дигитализацију и интеграцију свих фаза животног циклуса производа; умрежавање машина, производа, система и људи у компанији, као и умрежавање компаније, купаца и добављача; симулација, моделирања и виртуализацију процеса дизајна и производње; мерење, прикупљање и анализу великих количина података (енгл. Big data) (Duffy V.G. et al. 2003; Riaz Z. et al. 2006; Lee J. et al. 2015; Teimourikia M. et al. 2017; Zou P.X. et al. 2017).

Предложена тема докторске дисертације фокусирана је на истраживањима и практичној примени наведених концепата И4.0 у циљу решавања проблема из индустријске праксе у Србији. Из тог разлога, одабран је низ реалних проблема из области индустријског инжењерства за које се сматра да се могу унапредити развојем решења базираних на концептима И4.0:

### *Безбедност и здравље на раду*

Пошто се сви аутори слажу да ће (и поред смањења потребе за људском радном снагом) човек остати у центру И4.0, јасно је да Безбедност 4.0 представља важан корак ка достизању парадигме И4.0. Из тог разлога, потребно је извршити истраживања како би се утврдило како велике количине података (енгл. Big data), облак технологије (енгл. Cloud), вештачка интелигенција (енгл. AI), енгл. IoT, визуелизација података могу побољшати свакодневно управљање безбедношћу у индустријској пракси. Пошто је безбедност на раду широка област, фокус ће бити на решавању два конкретна проблема: 1) Управљање извештајима о небезбедним условима и небезбедним поступцима применом облак-технологија и мобилних уређаја, и 2) Примену алгоритама вештачке интелигенције за препознавање небезбедних поступака на радним местима која подразумевају транспорт материјала ручним индустријским колицима.

### *Контрола квалитета*

Аутоматизована контрола квалитета производа у реалном времену је један од најбитнијих поља И4.0, на којем је направљено доста помака последњих година. У овој дисертацији, предмет изучавања биће димензиона контрола производа. Једна од актуелних техника која се намеће као решење погодно за дигитализацију датог процеса

јесте компјутерска визија (енгл. Computer vision). У питању је техника доношења закључака на основу компјутерске анализе слика прикупљених помоћу дигиталне камере (у реалном времену) или анализом архивираних слика. Иако се компјутерска визија показала као поуздан алат за димензиону контролу делова направљених од чврстих материјала (нпр. метал или пластика), инспекција савитљивих делова направљених од гуме и даље представља изазов са аспекта аутоматизације и дигитализације. Из тог разлога, као трећи проблем који ће бити разматран у оквиру ове дисертације одабрана је инспекција екструдованих гумених профила применом техника компјутерске визије. Конкретно, задатак је дигитализовати и побољшати тренутно заступљени принцип рада, који је базиран на употреби профил-пројектора.

### *Логистика*

Заједно са технолошким напретком и усавршавањем начина развоја, производње, контроле, транспорта и пласирања производа, јавља се и потреба за усавршавањем организације пословних процеса унутар индустријских система у циљу повећања квалитета и ефикасности којом компаније одговарају на захтеве тржишта. У те сврхе развијен је енгл. Lean концепт, који је тренутно опште прихваћен начин за управљање индустријским системима. Укратко, Lean за циљ има повећање ефикасности компаније – тј. тежи постићи што више са што мање ресурса (мање простора, мање времена, мање материјала, мање људских ресурса) а да се при томе задовоље сви захтеви купца (купац и вредност коју он види у производу су у центру интересовања компаније). Lean је свеобухватан приступ, који у ширем смислу обухвата све гране производног процеса. У оквиру ове тезе, фокус ће бити на логистици – управљању токовима материјала у складишту производног погона, који се издвојио као репрезентативан проблем из индустријске праксе који се може унапредити применом концепата И4.0. У конкретном случају који ће бити разматран, уско грло представља немогућност запослених да у реалном времену визуелно испрате динамичан проток материјала који се на палетама транспортују у процесима набавке, производње и испоруке. Дакле, проблем који ће бити предмет истраживања јесте како унапредити управљање складиштеним материјалом применом техника машинске визије и облак технологија.

## **1.2. Научни циљ рада**

Основни циљ тезе јесте да се интердисциплинарним истраживањима унапреде различити процеси у Lean индустријским системима. Акцент ће бити на решавању низа практичних проблема из неколико области индустријског инжењерства (изложених у претходним секцијама) применом концепата Индустрије 4.0. Дакле, остваривање постављеног циља дисертације реализоваће се кроз следеће парцијалне циљеве – које је потребно испунити кроз решавање постављених студија случаја:

### *Студија случаја 1: Управљање извештајима о небезбедним условима и небезбедним поступцима*

Имајући у виду описане захтеве и изазове у претходној секцији, циљ је да се предложи оквир за управљање извештајима о небезбедним условима и небезбедним поступцима у реалном времену. Задати циљеви, које треба постићи, су да дигитализовано решење треба да буде: 1) доступно на мобилним уређајима, како би се олакшало ангажовање запослених и проактивна идентификација небезбедних услова и поступака; 2) генеричко и респонзивно, тако да корисници нису ограничени на одређену мобилну платформу; 3) отвореног кода, тако да решење буде приступачно и

прилагодљиво за потребе различитих врста предузећа; 4) скалабилно, тако да раст базе корисника не утиче на перформансе решења; 5) да омогући праћење задатака у реалном времену, тако да се ангажовање запослених може мерити, препознати и оценити. У том смислу, потребно је истражити тренутне трендове И4.0 и ИКТ, тако да предложено решење одговара тренутним и будућим потребама предузећа.

#### *Студија случаја 2: Димензиона контрола екструдованих гумених профила*

У оквиру ове студије случаја, циљ је развити решење базирано на принципу „цевовода“ (енгл. Pipeline). То значи да за разматрани проблем неће бити развијено решење које у једном кораку даје резултат (енгл. Black box), већ је потребно спровести низ сукцесивних корака и решити следеће проблеме који чине цевовод: 1) Аквизиција слике; 2) Калибрација система; 3) Сегментација контуре профила; 4) Идентификација кључних тачки; и 5) Поравнање-аугментација референтне контуре преко слике тренутно испитиваног профила на основу претходно детектованих кључних тачки.

#### *Студија случаја 3: Праћење тока материјала у складишту*

У оквиру ове студије случаја циљ је развити приступачан информациони систем који у реалном времену омогућава праћење тока материјала складиштеног на палетама. При томе, подразумева се да ће решење бити постављено (инсталирано) на централни енгл. Cloud сервер, преко кога ће се путем енгл. IP камера препознавати тренутне локације положаја товара (палета). Дакле, крајњи циљ је развој експертског система који ће препознати и умањити одступања рада запослених од предвиђених-оптималних процеса складиштења.

#### *Студија случаја 4: Препознавање и превенција небезбедних поступака*

Резултати рада на овој студији случаја је експертски систем за препознавање неправилних активности на основу визуелног праћења и анализе положаја тела запосленог. У те сврхе, потребно је развити одговарајућу експерименталну-мерну опрему за одређивање силе којом радник покреће колица, одредити максималну силу гурања-повлачења, као и алгоритме машинске визије за препознавање неправилног положаја тела приликом гурања колица на основу снимка из радног простора.

### **1.3. Хипотезе**

У складу са наведеним циљевима, дисертација се заснива на следећим хипотезама:

- I. Колекција, чување и обрада извештаја о небезбедним условима и небезбедним поступцима се може унапредити дигитализацијом. Овакав приступ олакшава проактивну идентификацију и едукацију о безбедности на раду, употребом мобилних уређаја и облак технологија.
- II. Употребом техника вештачке интелигенције и машинске визије могу се препознати небезбедни поступци запослених чији радни задаци укључују транспорт материјала ручним колицима.
- III. Инспекција екструдованих гумених профила се може дигитализовати и унапредити употребом техника машинске визије и дигиталне обраде слике.
- IV. Праћење токова материјала у складишту се може унапредити техникама машинске визије и интернет ствари. То се може постићи употребом одговарајућих штампаних кодова (нпр. QR или бар-код) или сензора (нпр. RFID), у комбинацији са камерама или читачима којима се може приступити путем интернета.

## 1.4. Преглед садржаја и организација дисертације

Како је индустријско инжењерство веома широка област, тешко је истражити све могућности и аспекте примене концепата Индустрије 4.0 у оквиру једног рада. Из тог разлога су издвојена четири репрезентативна проблема (студије случаја објашњене у секцији 1.2):

У првом поглављу дата су уводна разматрања и преглед садржаја дисертације, изложени су предмет и научни циљ рада и дат је кратак преглед садржаја дисертације.

У другом поглављу „Индустрија 4.0“, као што наслов указује, представљена је шира слика везана за И4.0 – почевши са кратким прегледом претходне три индустријске револуције. Укратко је представљено девет пилара И4.0, са акцентом на оне пиларе који ће у овој дисертацији бити разматрани као алати за унапређење Lean производних система.

У трећем поглављу „Управљање извештајима о небезбедним условима и небезбедним поступцима“ су представљени резултати рада на првој студији случаја<sup>1</sup>. Секција почиње уводним разматрањима о безбедности и здрављу на раду (БЗР), и илустрацијом значајности управљања небезбедним условима и небезбедним поступцима у циљу смањења броја повреда. Након прегледа литературе и актуелних комерцијалних решења, изложено је предложено решење – почевши од дефиниције захтева корисника (мала и средња предузећа), преко дискусије актуелних технологија и архитектуре решења, до детаља везаних за имплементацију. На крају, дата је илустрација и дискусија случаја употребе под називом енгл. „Safe-Tag“.

У четвртном поглављу „Димензиона контрола екструдованих гумених профила“ су представљени резултати рада на другој студији случаја<sup>2</sup>. Поглавље почиње елаборацијом значаја дигитализације датог процеса, и наставља се представљањем тренутних потреба и могућности дигитализације датог проблема. Након прегледа литературе и актуелних комерцијалних решења, представљено је решење развијено у оквиру ове дисертације. У наставку је дат детаљан опис свих корака алгоритма, и након тога, анализа добијених резултата – тј. перформанси решења. На крају секције, прецизирани су допринос и правци за даљи развој процедура за димензиону контролу екструдованих гумених профила.

У петом поглављу „Управљање палетама применом машинске визије, QR кодова и IP камера“ су представљени резултати рада на трећој студији случаја<sup>3</sup>. Полазећи од описа индустријске праксе у управљању палетама, дефинисани су захтеви и идентификовани недостаци тренутне праксе и дат је преглед тренутних решења. У наставку поглавља, предложен је приступачан и интуитиван систем за управљање

<sup>1</sup> Резултати прве студије случаја су публиковани у часопису Safety Science (M21): A. M. Vukicevic, M. Djapan, M. Stefanovic, I. Macuzic (2019) Safe-Tag mobile: A novel javascript framework for real-time management of unsafe conditions and unsafe acts in SMEs. Safety Science, 120, 507-516.

<sup>2</sup> Резултати друге студије случаја су публиковани у часопису IEEE Access (M21): A. M. Vukicevic, M. Djapan, P. Todorovic, M. Erić, M. Stefanovic, I. Macuzic (2019) Decision Support System for Dimensional Inspection of Extruded Rubber Profiles, IEEE Access 7, 112605-112616.

Почетком 2020. године, Фонд за иновациону делатност Републике Србије је финансијски подржао даља истраживања у оквиру пројекта Доказ концепта (пројекат ID 5184 „Примена вештачке интелигенције за визуелну инспекцију и контролу квалитета екструдованих гумених профила; енгл. AI4RubberQA“). Средином 2020. године, пројекат AI4RubberQA је подржан од стране. EU4TECH: Capacity Building for Technology Transfer in the Western Balkans.

<sup>3</sup> Извођење треће студије било је подржано пројектом: "Advanced system for material tracking and waste reduction - Napredni sistem za praćenje toka materijala i smanjivanje otpada" из Програма зелених иновационих ваучера Европске банке за развој (01-1/197).

материјалима који се заснива на концептима Индустрије 4.0 (машинске визије и рачунарства у облаку). Конкретно, потребно је истражити потенцијал примене и развити функционално решење базирано на употреби техника машинске визије, које ће служити као подршка запосленима.

У шестом поглављу „Препознавање небезбедних поступака код радних места која укључују задатке гурања и повлачења“ су представљени резултати рада на четвртој студији случаја<sup>4</sup>. Поглавље почиње излагањем основа ергономије гурања и повлачења терета, и наставља се прегледом литературе фокусиране на детекцију и превенцију неергономских поступака. У наставку, предложен је експертски систем базиран на употреби сензора силе и енгл. IP камере – односно алгоритмима компјутерске визије који реконструирају положај тела човека на основу монокуларних слика.

У седмом поглављу су дата закључна разматрања као и смернице за будућа истраживања почевши од резултата изложених у овој дисертацији.

У осмом поглављу је дата листа референци коришћених током израде дисертације.

### **1.5. Преглед метода које су коришћене током истраживања**

За истраживања у оквиру ове докторске дисертације коришћене су различите методе и алати из области информационог и индустријског инжењерства, моделирања, ергономије, компјутерске геометрије, обраде сигнала и слика. Конкретно, у првој студији случаја „Управљање извештајима о небезбедним условима и небезбедним поступцима“ коришћене су актуелне методологије и алати рачунарства у облаку (енгл. MongoDB NoSQL база података, Node.JS сервиси и енгл. React Native за развој мобилне апликације). Поред тога, у овој и другим студијама случаја, коришћени су енгл. UML дијаграми, као стандардни алати за пројектовање пословних информационих система. У другој студији случаја „Дименциона контрола екструдованих гумених профила“ коришћене су различите методе обраде и анализа слика, укључујући алгоритме за детекцију ивица, контура, *фитовање* геометријских облика (Хофове трансформације и Контекста облика). У трећој студији случаја „Управљање палетама применом машинске визије, QR кодова и IP камера“ коришћени су алати и библиотеке за приступ удаљеним IP камерама, као и алгоритми за препознавање и процесирање QR кодова. У четвртој студији случаја „Препознавање небезбедних поступака код радних места која укључују задатке гурања и повлачења“ коришћени су напредни алгоритми дубоког учења (библиотека PyTorch и енгл. VIBE алгоритам), као и National Instruments уређаји за мерење удаљеним сензорима.

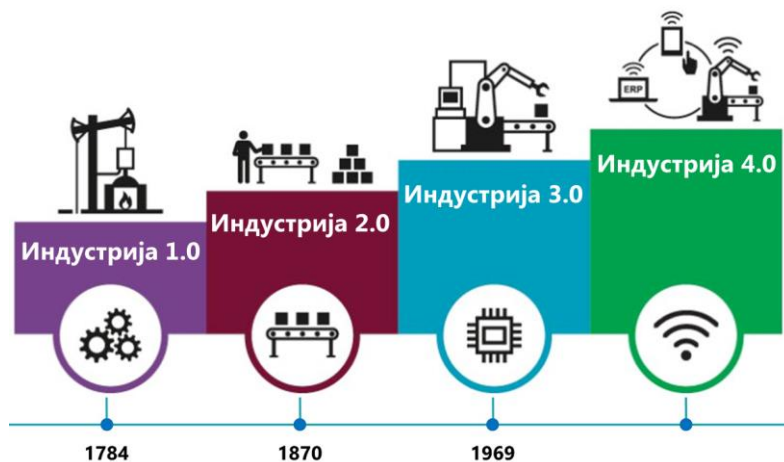
Имплементација предложених решења и метода је извршена коришћењем програмских пакета Matlab R2010a©, (Mathworks, Natick, MA, USA), C++ Visual Studio Express 2019 и Python Visual Studio Code (Microsoft, Redmond, WA, USA), и Arduino односно Android Studio. Добијени резултати су приказивани помоћу пакета Matlab R2010, Python библиотеке PyPlot и апликације ParaView (Sandia National Laboratory, Kitware Inc, Los Alamos National Laboratory, USA).

<sup>4</sup> У 2020. години, Фонд за науку је подржао даља истраживања на тему која је представљена у четвртој студији случаја (ID 6524219; "Artificial intelligence for managing workplace safety").



## 2. Индустрија 4.0

Индустрија 4.0 (И4.0) је термин којим се, са историјског аспекта, дефинише прогрес глобалне индустрије под утицајем технолошког напретка у последњих ~10 година. У наставку, прво ће бити дат кратак преглед претходне три индустријске револуције како би се стекла боља представа о врсти и степену напретка који И4.0 доноси са собом.



Слика 2.1 Четири индустријске револуције.

### 2.1. Појам „Индустријска револуција“

Сам појам „индустријска револуција“, у новијој историји, означава моменат када је човечанство прешло са мануелне и аграрне производње на производњу засновану на употреби машина које замењују људски-ручни рад (слика 2.1). Овај процес је започет у 18. веку, у данашњој Великој Британији, и брзо је узео маха у остатку света. Сам израз „индустријска револуција“ први пут се јавио у Француској јавности – али је економиста енгл. Arnold Toynbee (1852–83) први у литератури употребио тај израз да опише развој привреде у Енглеској у периоду од 1760. до 1840. године (Toynbee A. 1884; Wilson C.S. 2014). Индустријске револуције су комплексни историјски догађаји, и имају технолошке, политичке, социо-економске и културолошке компоненте. У оквиру овог рада, битно је поменути технолошке аспекте, односно употребе нових: 1) материјала; 2) извора енергије; 3) машина; 4) принципа управљања производњом; 5) система набавке и транспорта и 6) научних области које их подупиру. Ради концизније илустрације, у Табели 2.1 су приказани технолошки аспекти индустријских револуција које су се десиле у последњих ~250 година<sup>5</sup>. Формално, израз И4.0 је 2011. године прва употребила Влада Немачке да представи своју стратегију компјутеризације (дигитализације) производње у Немачкој (Kagermann W. et al. 2013).

<sup>5</sup> Периоди трајања у Табели 2.1 су дефинисани на основу више различитих извора у литератури, у којима се периоди трајања разликују (периоди адаптације индустријских трендова варирају – и зависе од тога које земље аутори узимају у обзир). Такође, у литератури се јављају и под-периоди (као што су Научно-технолошка револуција 1940-1970 и Информационо-телекомуникациона револуција 1975-2020).

**Табела 2.1** Компаративни приказ технолошких аспеката четири индустријске револуције (Toynbee A. 1884; Mokyr J. 2001; Wilson D. 2014; Mokyr J. 2018; Nuvolari A. 2019).

	Индустрија 1.0	Индустрија 2.0	Индустрија 3.0	Индустрија 4.0
Период	1780 – 1840 (~80 godina)	1870 – 1920 (~50 година)	1950 – 2010 (~60 година)	2011 -
Земље предводнице	Енглеска	Енглеска, Немачка, САД, Русија, Француска, Јапан	САД, Јапан, Немачка	САД, Кина, Немачка, Јапан, Ј. Кореа
Материјали	Гвожђе, текстил	Гума, легуре гвожђа и челика	Пластика, композити, Силицијумски чипови	Адитивни, паметни и нано материјали
Извори енергије	Угаљ	Течно гориво, струја	Нуклеарно гориво, батерије	Обновљиви извори енергије
Машине	Парна машина	СУС и електро мотор	Микропроцесор, рачунар	Роботи, Аутономни системи
Организација производње	Производна линија – серијска производња	Стандардизација и масовна производња	Аутоматизована и “outsourcing” производња	Дигитална производња и „remote“ рад са удаљености
Транспорт кључних ресурса	Парни воз, пароброд	СУС мотори, железнички транспорт	Авио саобраћај, глобални ланци снабдевања	Интернет
Комуникација	Писана	Телеграф и радио	Телевизија, Интернет	Сајбер-физички системи
Развој научних области	Физика, математика, филозофија	Хемија, биологија, материјали, медицина, социологија	Информатика, генетика, менаџмент, астро-физика, биоматеријали	Мултидисциплинарне и интердисциплинарне науке

## 2.2. Технолошки пилари Индустије 4.0

Са инжењерског аспекта, И4.0 се посматра као низ (девет) технолошких пиlara које савремене фабрике користе да побољшају своје производне процесе и технологије (слика 2.2).



Слика 2.2 Концепт<sup>6</sup> примене пиlara Индустије 4.0.

- Пилар Енгл. **IoT (Internet of Things)** – Интернет ствари подразумевају умрежавање „паметних уређаја“ (слика 2.3). Најраспрострањенији пример јесу паметни телефони – који имају приступ интернету и увелико су потиснули персоналне рачунаре као примарни уређај којим људи приступају информацијама на интернету. Међутим, циљ IoT јесте да се поменути тренд (који је успешно заменио класичне телефоне и рачунаре) примени на остале уређаје, попут носивих уређаја (сатова, медицинских уређаја и сл.), аутомобила, кућних уређаја, и било којих уређаја чији се рад може унапредити или олакшати разменом података са корисником и/или неким другим уређајима. У индустрији, овај тренд се назива енгл. Industrial Internet of Things (IIoT) и односи се на умрежавање разних сензора и самих уређаја (слика 2.4) – са циљем њихове синхронизације и унапређења рада (Khan W.Z. et al. 2020).



Слика 2.3 Интернет ствари<sup>7</sup>.



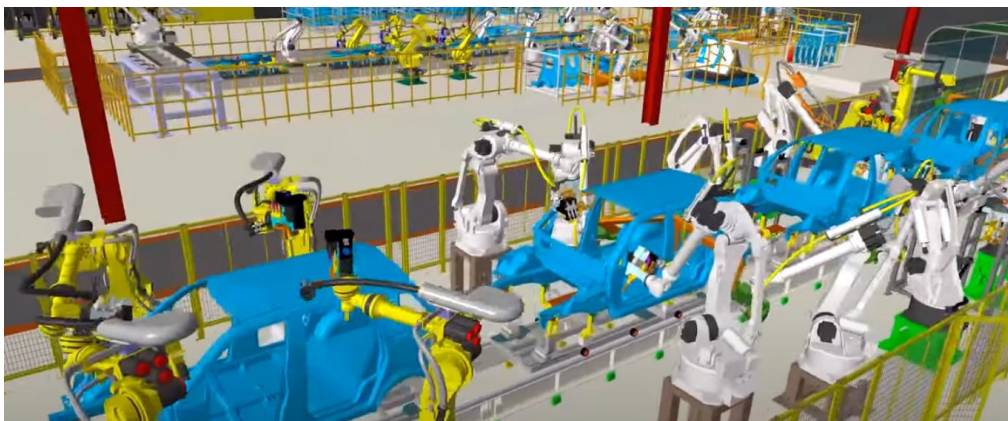
Слика 2.4 Идустијске интернет ствари<sup>8</sup>.

<sup>6</sup> Слика је преузета са интернет странице: <https://www.iotechy.com/what-is-industry-4-0-introduction-to-industrial-internet-of-things>.

- Пилар Енг. **Augmented Reality (AR)** – Проширена стварност корисницима омогућава интерактивно искуство реалног света помоћу наменских уређаја који врше проширивање онога што човек види са садржајем добијеним путем компјутерски-генерисаних информација (обично слика, али често се користе и разни сензори/уређаји који надограђују друга чула, попут чула слуха, или чуча додира) (Damiani L. et al. 2018). Широко познати AR уређаји јесу енгл. Microsoft HoloLens, Google glass, Toshiba dynaEdge AR100 Viewer, Epson MOVERIO BT-300, али се у последње време AR апликације могу користити и на мобилним и таблет уређајима. Укратко, AR технологије су базиране на алгоритмима обраде слика, компјутерске визије (који врше препознавање садржаја сцене и положај камере) и компјутерске графике (обично се за развој користе енџини за развој игара, попут енгл. Unity, али постоје и наменски AR енџини). Што се индустрије тиче, постоје бројне могућности примене, попут: 1) Обуке из безбедности на раду, 2) Логистике, 3) Одржавања, и 4) Контроле квалитета (слика 2.5).



Слика 2.5 Примери<sup>9</sup> употребе AR у индустријском окружењу.



Слика 2.6 Пример симулације дигиталне фабрике<sup>10</sup>.

<sup>7</sup> Слика је преузета са интернет странице: <https://www.experian.com/blogs/insights/2016/05/12-tips-to-safeguard-security-from-the-internet-of-things>.

<sup>8</sup> Слика је преузета са странице: <https://www.wildnettechnologies.com>.

<sup>9</sup> Сlike су преузета са: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2018/07/30/9-powerful-real-world-applications-of-augmented-reality-ar-today/#605033402fe9> и <https://www.microsoft.com/en-gb/hololens/apps>

<sup>10</sup> Слика преузета са <http://www.ezrobotics.com/eng>, видео је јавно доступан на линку <https://www.youtube.com/watch?v=1yL7sUxPYCo>.

**Напомена:** У овој секцији су наведени сви пилари индустрије 4.0, али су поједини објашњени укратко из разлога што дисертација не обухвата-користи све пиларе И4.0.

- Пилар **Симулација производње**, према дефиницији компаније Siemens, представља употребу рачунарског моделирања за развој и тестирање производних модела и поступака (укључујући производњу, монтажу, транспорт и др.). Основни циљ јесте смањење трошкова, односно времена потребног да се производни процес оптимизује – што симулације чини доста конкурентнијим и практичнијим од традиционалних метода (Breckle T. et al. 2019).
- Пилар **Адитивна производња** на првом месту подразумева употребу 3D штампања, и то у сврхе убрзаног развоја дизајна, прототипа производа и производње малог обима (пошто су наведени поступци веома скупи или спори ако би се изводили традиционалним приступима производње) (Savolainen J. et al. 2020).
- Пилар **Системска интеграција** подразумева интеграцију производних информационих система, са циљем развоја агилног окружења које у реалном времену може одговорити на захтеве и евентуалне проблеме.
- Пилар **Енгл. Cloud Computing** – Рачунарство у облаку је тренд развоја дистрибуираних софтверских система, чији се рад извршава на централним серверима (Banijamali A. 2020). Сам концепт дистрибуираног рачунарства није нов, али је развој интернета омогућио да се велике количине података размењују у готово реалном времену (што није било могуће нпр. деведесетих година) и у многоме је утицао на даљи развој ИКТ (информационо комуникационих технологија). За разлику од традиционалних приступа, где је пракса била да свака компанија има своју серверску станицу и запослене експерте за информационе технологије – тренд рентирања инфраструктуре у облаку показао се много ефикаснијим у последњих десет година. Укратко, услед брзог развоја технологија (рачунарске компоненте купљене данас – за пар година постају застареле) и поскупљења цена рада експерата који би одржавали сервере у фирмама, тренутно се више исплати рентирање инфраструктуре „у облаку“ (термин који означава непознато место, јер компаније сада не требају да „мисле“ где се инфраструктура физички налази). Из тог, и других разлога, извршавање софтверских апликација се померило са корисничких рачунара на сервере у облаку. Тренутно најзаступљенији сервис тог типа јесте енгл. Amazon Web Services; а модели којима се услуге у облаку нуде компанијама јесу: енгл. Infrastructure as a service (IaaS), енгл. Platform as a service (PaaS), енгл. Software as a service (SaaS).
- Пилар **Аутономни системи** се често меша са појмом аутоматизације (програмирање машине да ради или понавља одређену операцију). Под аутономним системима се мисли на машине које су способне да, без интервенције човека, адаптирају своје понашање као одговор на непредвиђене догађаје околине у којој раде (Watson D.P. et al. 2005). У последње време, користи се прецизнија дефиниција која препознаје пет нивоа аутоматизације: 0) Машина нема аутономију – човек у потпуности контролише систем; 1) Систем и

човек заједно управљају процесом, али је човек у сваком моменту одговоран за функционисање (пример: радар у подморници); 2) Парцијална аутономија у предефинисаним ситуацијама, човек је увек одговоран али дефинише моменте када систем преузима одлучивање (пример: аутопилот на бродовима, који контролише брзину и руту према предефинисаним упутствима); 3) Условна аутономија у одређеним ситуацијама, систем ради самостално и у одређеним моментима упозорава човека када треба да преузме контролу (пример: аутономна возила на аутопуту); 4) Висок ниво аутоматизације, када систем може потпуно самостално да функционише, а човек има могућност да преузме контролу (пример: аутоматско паркирање аутомобила); 5) Потпуно самостално функционише и није предвиђена било каква асистенција човека. Последњих година, све више пажње се посвећује тзв. колаборативним роботима – чији задатак није да замене човека већ да раде заједно са њим на одређеним радним задацима (Vicentini F. 2020).

- Пилар **Сајбер-безбедност** је посебан пилар зато што се, са повећањем броја повезаних уређаја и протока информација на глобалној мрежи, драстично повећала могућност да злонамерни појединци нанесу огромну штету појединцима и компанијама (Alguliyev R. et al. 2018). Ово је посебно опасно у индустријским системима, где хаковањем машина и робота неко може угрозити безбедност радника који раде у њиховом окружењу и/или направити значајну материјалну штету компанији.
- Пилар **Анализа велике количине података** јесте пилар који се фокусира на проналажење корисних информација и скривених шаблона у огромним количинама података (који се „гомилају“ са повећањем броја уређаја конектоватних на глобалну мрежу). За те сврхе користе се алгоритми вештачке интелигенције, статистике и енгл. Data mining.

На крају ове секције, напомиње се да се у литератури могу наћи и другачији називи и поделе пилаара И4.0. Поред наведених, постоји и краћа групација технологија И4.0 које служе за објашњавање појма „Паметне фабрике“ или „Индустрије 4.0“, попут:

- Сајбер-физички системи,
- Интернет ствари,
- Рачунарство у облаку, и
- Когнитивно рачунарство.

### **2.3. Могућности примене технолошких пилаара И4.0 у LEAN индустријским системима**

Потреба за интензивним и континуираним унапређењем производних и пословних процеса представља најважнији елемент пословне стратегије индустријских система организованих на Lean принципима. Ригорозно постављени критеријуми перформанси које карактерише нулта толеранција према свим облицима губитака и расипања намећу Lean индустријским системима императив за



напуштањем традиционалних приступа и принципа у циљу изналажења нових модела, као и инвентивних и напредних алата који ће омогућити достизање строгих критеријума изврности који се често означавају синтагмом ”производња светске класе”.

Индустрија 4.0, са својим технолошким пиларима и припадајућим алатима и методима, представља свакако најбогатији, најперспективнији и најизазовнији инжењерски ресурс који Lean индустријски системи могу имплементирати и остварити читав низ компаративних предности и разноврсних бенефита. Компаније које свој модел организације и управљања производним и пословним процесима базирају на развијеним Lean индустријским концептима, као што су WCM (World Class Manufacturing) и TPM (Total Productive Maintenance/Manufacturing) имају и додатне предности и погодности за стимулативни приступ имплементацији алата и метода И4.0. Пре свега WCM, TPM и Lean индустријски системи такође имају развијене пиларске структуре (8 или 10 техничких пиlara), које представљају основне сегменте и процесе савремених производних система.



**Слика 2.7** Технички пилари LEAN индустријских система.

Комбинација пиларских структура И4.0 (приказаних на слици 2.2) и Lean индустријских система (приказаних на слици 2.7) представља захвалну и флексибилну платформу за спровођење научне анализе могућности и ограничења имплементације као и за различите комбинације и варијације у избору алата и метода И4.0 са једне стране и места њихове имплементације и постављених циљева,

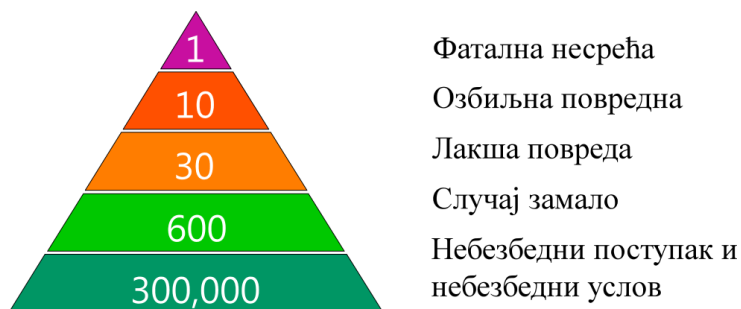
са друге стране. Такође, резултати унапређења у оквиру посматраног техничког пилаара Lean индустријског система може се верификовати кроз праћење прецизно дефинисаног сета показатеља означених као КПИ – кључни индикатори перформанси. Све наведено омогућава да се анализи проблема имплементације И4.0 у Lean индустријске системе може приступити сепаратно и фокусирано, кроз идентификацију процеса и модел зона у којима се могу очекивати значајни резултати у виду унапређења посматраних параметара процеса.



### 3. Управљање извештајима о небезбедним условима и небезбедним поступцима

#### 3.1. Безбедност и здравље на раду

Област безбедности и здравља на раду (БЗР) се може посматрати из више различитих углова (Hollnagel E. 2014). У оквиру ове дисертације, биће разматрани проблеми из области безбедности и здравља на раду (engl. Occupational safety and health – OSH), као мултидисциплинарној области која се бави побољшањем безбедности, здравља и благостања (engl. Welfare) људи у радном окружењу. У току последње деценије, циљеви и критеријуми безбедности на радном месту су се променили на глобалном нивоу. Данашња индустрија има иницијативу за постизањем тзв. циља „нула повреда“<sup>11</sup>, као најприкладнијег и најпожељнијег броја повреда и незгода у производном процесу. Укратко, „компаније са нултим акцидентима“ усмеравају своју пажњу и активности на проактивну идентификацију догађаја-претходника несрећа, чија би контрола и благовремена превенција требала спречити појаву несрећа на раду.



Слика 3.1 Пирамида безбедности.

##### 3.1.1 Пирамида безбедности

Појава ризичних ситуација је неизбежна на готово сваком радном месту. Опште познати пример јесте радник на градилишту који не носи заштитни шлем. Безбедносни пропусти оваквог типа су постали уобичајена појава (јер директно не изазивају повреде на раду), и као последица, однос запослених према тој мери безбедности често остаје непромењен-погрешан. Као последица, често се дешава да тешке повреде буду узроковане управо оваквим примерима неправилног понашања и непоштовања безбедносних прописа. Херберт Хајнрих (енгл. Herbert William Heinrich) је у својој књизи „Industrial Accident Prevention, A Scientific Approach“ из 1931. године истражио и објаснио односе и узрочно-последичне везе између узрока

<sup>11</sup> Савремене филозофије производње, као што су производња светске класе (енгл. World Class Manufacturing – WCM), лин производња (енгл. Lean), Toyota Production System (TPS), све инсистирају на достизању нултог броја повреда на радном месту.

и несрећа на радном месту (Heinrich W. 1931). Наиме, он је дошао до закључка да свакој озбиљној повреди претходи ~29 мањих повреда, односно ~300 инцидентата који су прошли без повреда радника. Тридесет година касније, 1961., Франк Бирд (енгл. Frank Bird) је проширио Хајнрихов рад за потребе осигуравајућих кућа (Hughes P. 2009). Разматрајући архиву од око два милиона инцидентата у преко 300 компанија, дошао је до закључка да: „свакој озбиљној повреди претходи десет лакших, односно тридесет инцидентата који изазивају оштећење радне опреме (али не и људства), односно шест стотина инцидентата који нису изазвали повреде запослених и оштећење опреме. Године 2003, студија фирме Conoco Phillips Marine је надоградила постојећи модел – закључком да свакој фаталној несрећи на раду претходи 300000 небезбедних поступака/догађаја (Manuele F. 2002). Данас, описани однос и редослед пораста небезбедности на раду назива се „пирамида безбедности“ или „Хајнрихов троугао“ или „Хајнрихова пирамида“ – чија је скица приказана на слици 3.1.



Слика 3.2 Пример небезбедних услова, небезбедних поступака и њихових последица.

### 3.1.2 Небезбедни услови и небезбедни поступци

Према Хајнриховој пирамиди, проактивна идентификација небезбедних услова (НУ) и небезбедних поступака (НП) има највећи утицај на укупну безбедност (Heinrich H. 1941). Генерално, сматра се да су класификација и документација НУ и НП интуитивнији радни задаци у поређењу са препознавањем-детекцијом (Gnoni M. et al. 2012). Обично се овај изазов објашњава разликама у перцепцији појединаца-радника о ризику, што зависи од претходног искуства и тренинга о безбедности на раду (Gnoni M. et al. 2013, Gnoni M. et al. 2017). У недавној студији, НУ и НП дефинисани су као претходници догађаја што их јасно разликује од могућих и избегнутих повреда (Shin M et al. 2014, Baldissone G. et al. 2019). Иако се дефиниција и значај НУ и НП могу разликовати у зависности од врсте индустрије и/или компаније, неки од типичних примера НУ су: неприкладна радна одећа за специфичне радне активности, лоше осветљење, недоступност заштите итд. док су примери НП: употреба неисправне опреме, употреба опреме без одобрења, уклањање сигурносних уређаја, остављање алата и опреме на неприкладном месту

итд. Иако постоје препоруке предложене у регулаторним стандардима<sup>12</sup>, управљање безбедношћу на радном месту на традиционалан начин показало се напорним и сложеним процесом. Будући да се форме НУ и НП могу разликовати од физичких до дигиталних, све су већи захтеви за наменским решењима која би могла да помогну у проактивном спречавању несрећа путем дигитализованог управљања извештајима о БЗР.

Идентификација захтева и изазова безбедности на раду представља полазну тачку за разумевање како се тренутна пракса може унапредити применом пилара И4.0. У литератури, предложена су следећа решења: виртуелно окружење (Deb S. et al. 2017), сензори за прикупљање великих количина података (Pilloni V. 2018), RFID системи (Bauk S. et al. 2018), примена симулација и моделирање окружења (Golabchi A. et al. 2015), као и носиви системи за побољшање безбедности на радном месту (Wu F. et al. 2019). Већина ових решења се још увек развија и неке од њих подразумевају и значајна улагања – што је уједно и главна баријера малих и средњих предузећа (МСП) (Legga S.J. et al. 2015). У оквиру овог рада нагласак ће бити на потребама МСП због чињенице да они генеришу највећи део БДП (брuto друштвени производ) и могућности запошљавања у развијеним земљама. Из тог разлога је претпостављено да ће се постићи већи допринос кроз разматрање и решавање њихових проблема и потреба.

### **3.2. Претходна истраживања и изазови у управљању БЗР и НУ/НП**

Важност сталног унапређења система управљања безбедношћу (СУБ) обрађени су у раду аутора Li et al., који су извршили детаљни преглед теме и препоручили кључне аспекте који побољшавају ефикасност СУБ-а (Li Y. et al 2018). Међутим, правилна примена у великој мери зависи од исправности анализе ризика као и од усклађености са свим релевантним стандардима и прописима (Demichela M. et al. 2004). Тренутно постоји низ препоручених приступа за постизање вишег нивоа БЗР у компанијама (Harms-Ringdahl, 2004), који ће бити разматрани у остатку овог параграфа (Harms-Ringdahl L. 2004). Wahlström and Rollenhagen (2014) су предложили концепт МТОИ (Човек, технологија, организација и информације – енгл. Man, Technology, Organization and Information) као подршку за успешну имплементацију СУБ-а (Wahlström B. et al. 2014). У другој студији, Grote је дефинисао различите факторе који утичу на начин на који би систем управљања БЗР требало применити и прилагодити различитим врстама компанија (Grote G. 2012). Bragatto et al. су у својој студији разматрали заблуде и неразумевање између регулаторног система безбедности и реалних услова у малим и средњим предузећима (Bragatto P. et al. 2015). Исти аутори су навели да је систем управљања безбедношћу, као концепт, за већину практичара чиста "*напурологија*" и да се битно разликује од стварних услова који могу угрозити област заштите здравља на раду.

<sup>12</sup> ISO 9001 (quality management), ISO 14001 (environmental management) standards and ISO45001 (Occupational Health & Safety Assessment Series) & OSHA VPP (Voluntary Protection Programs) certifications.

Стога су главни изазови БЗР како дигитализовати и аутоматизовати процес управљања применом ИКТ.

Употреба напредних технологија посматра се као битан допринос развоју Безбедности 4.0 у различитим секторима индустрије. Удаљени уређаји (енгл. Remote devices), попут: *Arduino* микроконтролера (Jung M. et al. 2016), RFID (Bauk S. et al. 2018) и бежичних сензора (Aronte-Luis et al. 2018), мобилни уређаји (Savaliya P.V. et al. 2015) су неки од примера успешно примењених трендова И4.0 у индустријској безбедности. Тренутно постоји велики број комерцијално доступних софтвера / система који се односе на БЗР, а који су засновани на употреби поменутих технологија. У литератури су неки аутори изразили забринутост јер су комерцијална решења: конципирана као *трећа-надограђена решења* (енгл. Third-party solutions), ограничена за накнадна прилагођавања и дораде, неподобна за комуникацију у реалном времену на разним мобилним уређајима и сл. (Zou P.X. et al. 2017). Са становишта малих и средњих предузећа, већина оваквих система изискује додатне трошкове за уградњу додатних функција, специфичних за врсту и величину пословања (Sala G. et al. 2018). С обзиром да већина малих и средњих предузећа има специфичне потребе и ниже буџете, посебно у поређењу са великим компанијама које могу да приуште сложене ИКТ системе, циљ ове дисертације је био истражити могућности употребе паметних уређаја и облак технологија за побољшање безбедности на раду. Истовремено, претпостављено је да су кључни захтеви МСП да решење треба да буде генеричко, компактно, прилагодљиво и приступачно. Да би се развио такав оквир (енгл. Framework), било је потребно водити рачуна о три захтева која су анализирана у остатку овог одељка.

Први захтев је везан за пренос и складиштење података. До сада је облак технологија показала највећи потенцијал за побољшање управљања безбедношћу на раду. Као што су наведена истраживања показала, наменски системи у облаку могу значајно побољшати перформансе безбедности; из тог разлога, намеће се очекивање да ће у скорој будућности таква решења прихватити многе гране индустрије (Zou P. et al. 2017).

Друго питање јесте прикупљање података. Поред већ споменутих, постоји низ решења која се заснивају на коришћењу носивих сензора (енгл. Wearables) (Nath N.D et al. 2017, Schall et al. 2018). Bauk et al., су предложили употребу личне заштитне опреме енгл. PPE (енгл. Personal protective equipment) уређаја опремљених активним / пасивним RFID уређајима (Bauk S. et al. 2018). Други аутори су такође предложили сличан приступ заснован на коришћењу RFID и енгл. Bluetooth ниске енергије (енгл. Bluetooth Low Energy *BLE*), како би се побољшала безбедност на радном месту (Park J. et al. 2017). Међутим, коришћење носивих сензора за праћење фактора ризика који се тичу БЗР на радним местима показали су и низ недостатака. Генерално, већина препрека се односи на поштовање приватности и поверљивости запослених, као и на величину трошкова, и поузданости сензора и трајност њихових батерија (Schall et al. 2018). Као решење, неки аутори су предложили прикупљање података помоћу Android уређаја који имају уграђене сензоре који могу бити од помоћи и бежичне (WiFi) конекције за комуникацију са прикљученим или даљинским сензорима (Szydło T. et al. 2016).

Треће питање је избор оптималних хардверских и софтверских енгл. API-ја, који би требало да се користе за имплементацију целокупног решења. У безбедности на раду, мобилни уређаји се користе већ неко време (Ibekwe T.S. et al. 2016). Тренутно постоје специјализована решења за управљање безбедношћу у системима хемијског инвентара, заштите на раду и ергономије; апликације за мерење осветљења засноване на паметним телефонима и др. Улоге ових апликација су различите, почев од учења до система за пријављивање догађаја (Johnson C. 2002).

### 3.2.1 Преглед актуелних софтверских решења за дати проблем

Развој информационих система за потребе управљања небезбедним условима и небезбедним поступцима у великој мери је због комерцијалног потенцијала предмет рада индустрије, а мање научне заједнице. У овој секцији дат је преглед неких решења и њихових основних функционалности.

SafetySync - У питању је апликација у облаку за управљање БЗР (<https://www.safetysync.com>). За циљ поред мониторинга има и пружање тренинга и информисања запослених о актуелним законским регулативама и стандардима. Циљна група су предузећа свих величина. Ток употребе је базиран на слању низа инструкција и процене способности запослених да извршавају радне задатке дефинисане према одговарајућим стандардима.

Assignar је софтвер у облаку, који је намењен ширем спектру индустријских грана (<https://www.assignar.com>). Базиран је на слању-употреби временских линија, табела, наменски-креираних форми, систему доделе и награде за испуњене радне задатке.

SiteDocs је још једна облак-апликација, која омогућава управљање безбедношћу на раду из интернет претраживача (<https://www.sitedocs.com>). Примарно је намењена за грађевинарство и одржавање индустријских постројења. Кључне функционалности су дигитално управљање документацијом, усклађивање пословних процеса и тзв. огласне табле. Одговорним лицима пружа у реалном времену информације о сертификатима, обучености и акцијама које запослени предузимају на терену.

SafetyTek је платформа у облаку за управљање ризицима везаним за здравље и безбедност на раду (<https://safetytek.ca>). Развијена је за шире потребе, а примарни корисници су из области индустрије нафте и гаса, конструкција и електронске опреме кућне намене. Функционалности укључују управљање извештајима, процена ризика од небезбедних услова, генерисање извештаја о повредама итд.

### 3.3. Циљ и постављени задаци студије

Узимајући у обзир описане захтеве и изазове БЗР 4.0, циљ ове студије случаја био је предложити нови оквир за управљање небезбедним условима и небезбедним поступцима у реалном времену. Сходно томе, претпостављено је да решење треба бити:

- могуће користити са мобилних уређаја како би се олакшао ангажман запослених и проактивна идентификација НУ/НП у реалном времену,
- генеричко, тако да корисници нису ограничени на одређену мобилну платформу,
- прилагодљиво, тако да може бити приступачан и прилагођен за разне индустрије,
- скалабилно, тако да раст базе корисника не утиче на перформансе система,
- инклузивно, тако да се ангажовање запослених може мерити и препознати.

У овом раду, акценат је на пројектовању и развоју прототипа решења (енгл. Minimal Viable Product) којим би се остварили постављени циљеви и задовољиле минималне индустријске потребе. Пројекат имплементације предложеног система треба да садржи: идентификацију индустријских захтева (активност 1 – А1). А1 треба омогућити дефинисање пословног плана и техничке документације за развој решења за управљање безбедносним ризицима у индустријском радном окружењу, које треба бити базирано на интернет сервисима енгл. “Cloud”. Интуитивна (енгл. User friendly) апликација треба да буде развијена као алат који може побољшати процес прикупљања, анализе, приоритизације, генерисања извештаја о НУ/НП као и делегирању одговорних особа (А3).

Поред пројектног плана, у документу је описана демо-апликација базирана на употреби актуелних технологија за развој мобилних и интернет апликација. Предложено решење има за циљ да олакша пословне активности, како за запослене тако и за послодавце, и то кроз:

1. Интуитивну и аутоматизовану идентификацију кључних индикатора безбедности на раду,
2. Унапређење тренутних система и сервиса за управљање извештајима,
3. Побољшање информисаности и свести запослених о безбедности на раду кроз општу укљученост у целокупан процес детекције и превенције НУ/НП,
4. Боље разумевање и мерење доприноса запослених безбедности на раду,
5. Развој генеричке технологије која би била доступна и погодна за коришћење у ширем спектру индустријске заједнице.

### **3.3.1 Кратак опис корисника и њихове интеракције са системом**

Генерално, менаџмент задужен за управљање БЗР укључује запослене у постројењу и њихове претпостављене који попуњавају и обрађују извештаје о безбедности на раду. Поменути извештаји могу бити генерисани од стране обе групе, али само одговорна лица (менаџер БЗР) могу имати дозволу да делегирају и контролишу делегиране радне задатке. Управљање безбедношћу радних услова може бити веома захтеван и комплексан посао, пошто захтеви по питању безбедности могу варирати од физичких до дигиталних. У нашем случају, циљ је предложити решење за дефинисано уско грло – упркос томе што су НУ и НП добили велику пажњу од стране научне и стручне заједнице из области безбедности и здравља на раду, у нашој земљи, тренутни приступи подразумевају мануелно попуњавање и управљање документацијом (сходно ISO 9001 – Управљање

квалитетом, ISO 14001 – Заштита животне средине и ISO 45001 – Системи управљања заштитом здравља и безбедношћу на раду.

У остатку ове секције прво је објашњен усвојени-предложени концепт БЗР 4.0 (Одељак 3.4), а затим предложена његова одговарајућа генеричка софтверска архитектура (Одељак 3.4.1) и ток рада (Одељак 3.4.2). У поређењу са претходним студијама, циљ овог рада јесте детаљније размотрити трендове мобилних, облак технологија и БЗР 4.0. На крају, биће приказан случај употребе, који илуструје предности усвајања предложеног решења (поглавље 3.5).

### 3.4. Концепт БЗР 4.0 у LEAN предузећу

Графичка илустрација предложеног решења је дата на слици 3.3 (Vukicevic A. et al. 2019), и за циљ има подржати напоре компаније у заштити имовине, запослених и пословних процеса дигитализацијом управљања БЗР. Посматрајући произвољну фабрику – под називом „Фабрика X“, кључне компоненте предложеног решења су: 1) Централни енгл. Cloud сервер и 2) Удаљена мобилна апликација (која може бити покренута на Андроид уређајима, таблетима или телефонима постављеним на одговарајућим местима у хали). Ове две компоненте биће доступне следећим групама корисника: радницима у погону и менаџерима/инжењерима безбедности. Радницима су додељена права за употребу Андроид апликације за колекцију НУ и НП, као и за примање порука од надређених менаџера БЗР. Са друге стране, менаџери БЗР ће бити у могућности да користе апликацију како за прикупљање података тако и за делегацију инструкција на основу увида у прикупљене податке. Заједно са инжењерима безбедности (запосленима у погону који су задужени да извршавају инструкције добијене од менаџера), они су корисници вишег приоритета у представљеном систему.



Слика 3.3 Преглед-концепт предложеног решења<sup>13</sup>.

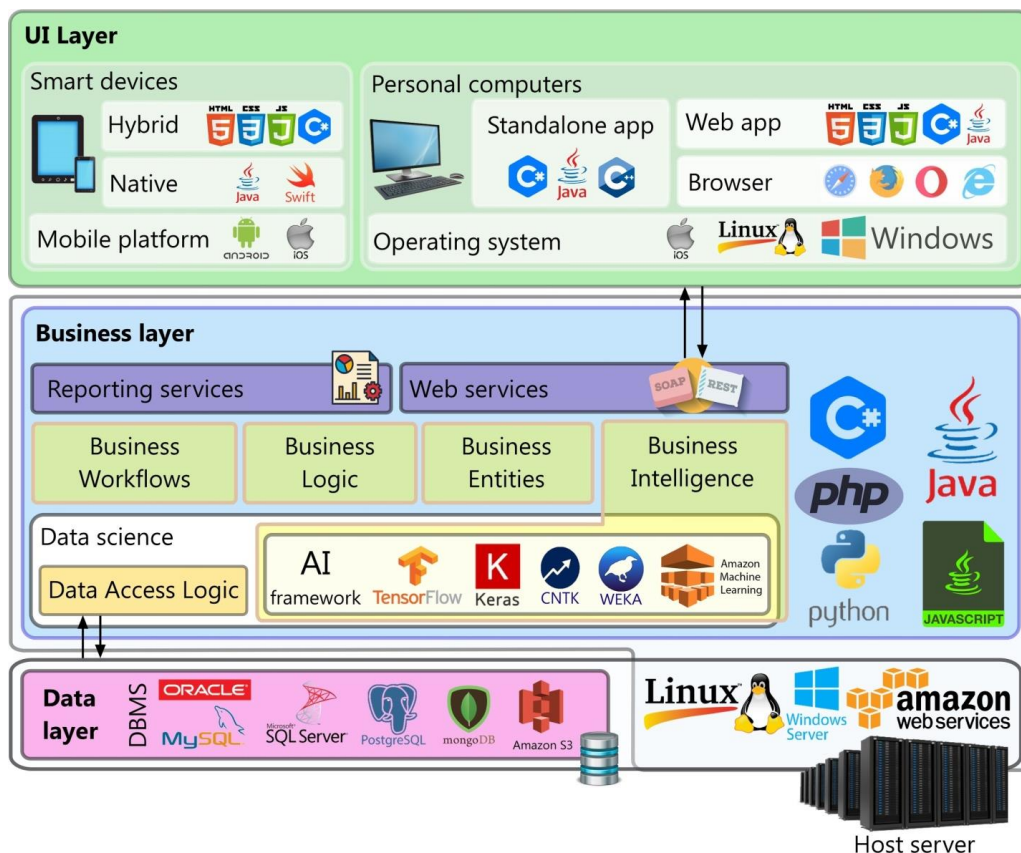
<sup>13</sup> Слика преузета из рада Vukicevic A. et al. 2019.



### 3.4.1 Софтверска архитектура и актуелне технологије за њену имплементацију

Генеричка софтверска архитектура приказана је на слици 3.4 (Vukicevic A. et al. 2019). Генерички облик је коришћен као најприкладнији за разматрање различитих технологија доступних за имплементацију његових специфичних делова (слојева). Касније ће, у одељку 3.5, бити приказан конкретан случај употребе како би се јасније размотрили текући технолошки трендови и образложили избори технологија током имплементације.

Целокупно решење је подељено у слојеве (енгл. Layers), где су две кључне компоненте енгл. Backend сервиси (који се покрећу на енгл. Cloud серверу) и енгл. Frontend (који се покреће на носивим уређајима или интернет-претраживачима). Предност дељења архитектуре на слојеве-модуле који међусобно комуницирају је двострука. Прво, компоненте се могу користити независно; а друго, различите технологије могу се користити за имплементацију различитих слојева (Razavian M. et al. 2019). Осигуравање такве флексибилности је важно за омогућавање скалабилности и проширивости функционалности система, које би се касније могле проширити након раста МСП-а или заменити надолазећим технологијама.



Слика 3.4 Генеричка софтверска архитектура БЗР 4.0 решења<sup>14</sup>.

<sup>14</sup> Слика преузета из рада Vukicevic A. et al. 2019.



Функционалности пословног слоја (енгл. Business layer) су имплементирани као веб-сервиси (енгл. Web services) у облаку (у основи, то су функције које се могу позвати са удаљеног уређаја, нпр паметних телефона или претраживача). Данас, веб-сервиси се углавном покрећу на Linux, а нешто ређе и на Windows Server, оперативним системима зависно од типа технологије које су коришћене за имплементацију слоја пословне логике (енгл. Backend). Тренутно актуелне<sup>15</sup> технологије и програмски језици који су у потреби за имплементацију веб-сервиса јесу: Microsoft C#, Java, PHP, Python, JavaScript (Node.JS) као и C++. Сви НУ/НП који се прикупе од стране корисника се чувају систему за чување и управљање подацима (енгл. DBMS) који су инсталирани на дата-серверима<sup>16</sup>. Најчешће коришћени енгл. DBMS су Oracle, MySQL, Microsoft SQL Server, PostgreSQL и од недавно све заступљенији MongoDB.

Кориснички (енгл. UI или енгл. Frontend) слој подразумева интуитиван кориснички интерфејс који омогућава корисницима да интуитивно користе веб-сервисе постављене на централном серверу у облаку. У овом параграфу разматране су две врсте апликација: 1) апликације које се покрећу у оквиру веб-претраживача на рачунарима; и 2) апликације које се покрећу на паметним уређајима. Што се тиче развоја веб-апликација, тренутно постоји снажан тренд употребе HTML (енгл. Hypertext Markup Language), CSS (енгл. Cascading Style Sheets) и JavaScript технологија иако постоје и алтернативни оквири развијени за Java (AWT, Swing, Swt, SwingX, JavaFX etc.) и C# (ASP.NET, Silverlight) програмске језике. Што се тиче паметних уређаја, они се могу поделити на основу својих оперативних система на: Android, Apple iOS и Microsoft Windows Phone (при чему Android и iOS заузимају ~98% тржишта). Нативни програмски језици за Android и iOS уређаје су Java and Swift, респективно; иако постоје могућности употребе *врапера*-обвојница који омогућавају писање мобилних апликација и у другим програмским језицима попут JavaScript, C++, C# и др.

Коначно, важан аспект пословно оријентисаних софтверских система јесте пословна интелигенција - примена AI за подршку и аутоматизацију процеса одлучивања (López-Robles J.R. et al. 2019). Укратко, AI алгоритми су развијени тако да анализирањем или учењем из прикупљених података бивају обучени да интелигентно обрађују нове-претходно невиђене податке (уобичајени задаци су груписање енгл. Clustering, процена енгл. Estimation, предвиђање енгл. Forecasting, класификација енгл. Classification и препознавање образаца енгл. Pattern recognition). Пробојем AI у свим гранама индустрије, енгл. Python и енгл. R програмски језици (са пратећим библиотекама) су се издвојили као најчешће коришћени за обраду и рад са подацима.

Укратко, као што се може приметити, доступан је широк спектар технологија - тако да оптималан избора технологија за сваки од наведених слојева постаје важан фактор, јер утиче на трошкове и изводљивост њихове интеграције у крајњи и

---

<sup>15</sup> <https://insights.stackoverflow.com/survey/2019>

<sup>16</sup> Слојеви података (енгл. Data layer) и пословне логике (енгл. Business layer) могу бити имплементирани на истим или дистрибуираним веб-серверима.

функционалан дигитализовани систем извештавања (који је дефинисан као крајњи циљ БЗР 4.0).

### 3.4.2 Ток употребе предложеног оквира

Скица тока употребе (енгл. Workflow), са нагласком на интеракцију корисника и протоку података, дата је на слици 3.5 (Vukicevic A. et al. 2019). Претпостављено је да идентификација НУ и НП представља почетак процеса. Као што је раније споменуто, пријављивање НУ и НП је дозвољено свим корисницима (запосленима, инжењерима одржавања и безбедности). Извештавање претпоставља дефинисање НУ и НП: врста, локација и ниво ризика. Након слања извештаја систему, одговорна особа прима обавештење и треба да креира акцију (радни задатак) на основу прикупљених информација. Задатак може бити: а) слање упутства запосленима на месту догађаја (тј. кораци њихових даљих радњи или појашњења ако су погрешно разумели пријављени НУ/НП); и б) слање упутства инжењеру за одржавање да реши проблем. По завршетку посла, инжењер за одржавање шаље повратну информацију систему - који обавештава менаџера за безбедност и здравље на раду о тренутном статусу задатка. Ако је задатак успешно обављен, менаџер безбедности затвара задатак; у супротном, он наставља преписку и даје додатне инструкције све до успешног решења пријављеног проблема.



Слика 3.5 Дијаграм тока са илустрацијом основних функционалности и корисника система<sup>17</sup>.

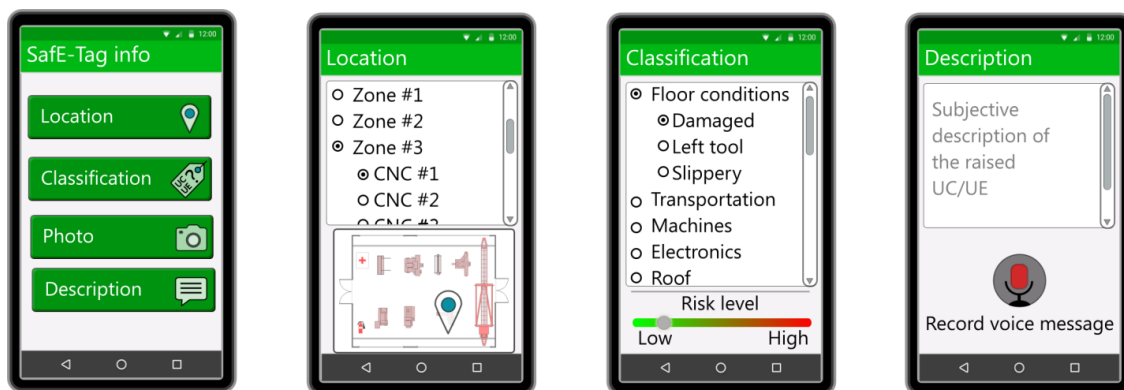
Сви прикупљени подаци се чувају на централном серверу у облаку, као што је приказано на слици 3.5. Будући да извештаји садрже информације о пошиљоцима, што омогућава компанијама да додељују и стимулишу запослене који доприносе

<sup>17</sup> Слика преузета из рада Vukicevic A. et al. 2019.

безбедности, као и да пружи додатну обуку запосленима који погрешно разумеју безбедност на раду. Аутоматизација извештавања и проактивни допринос свих запослених главна су достигнућа компанија са тенденцијом да достигну изврност у безбедности на раду. Поред ефикасне израде извештаја о безбедности, дугорочна корист дигитализованог извештавања о безбедности је и омогућавање дубинске анализе перформанси БЗР коришћењем алата пословне интелигенције.

### 3.4.3 Функционалности и кориснички интерфејс

Сврха предложене мобилне апликације је да омогући прикупљање и управљање НУ и НП у реалном времену. Сваки извештај треба да пружи јасне одговоре на четири кључна питања која прецизно идентификују сваки НУ и НП: „Локализовати?“, „Класификовати?“, „Одредити приоритете?“ И „Описати?“ (слика 3.4.3.1, Vukicevic A. et al. 2019).



Слика 3.6 Изглед корисничког интерфејса-функционалности за извештавање о НУ и НП. Корисник треба да наведе локацију, врсту, опис и приоритет пријављеног НУ/НП<sup>18</sup>.

**Локализација** НУ/НП путем интуитивног графичког корисничког интерфејса (енгл. GUI). Ово подразумева прецизну локализацију, која би се могла обавити одабиром унапред дефинисаних тачака у листи менија (нпр. са именованим секторима радног погона). Алтернативно, могу се користити неке врсте сензора (попут GPS, RFID или Bluetooth), али ми бисмо их желели избећи у нашој студији под претпоставком да је радни простор затворен и да нису потребна додатна улагања за читаче/писаче специјализованих картица и сензора.

**Класификација** НУ и НП пратећи препоруке индустријских стандарда. Класификација подразумева одабир унапред дефинисаних опција (НУ/НП) из одговарајућег менија. Листа може варирати у зависности од врсте МСП-а (величине, врсте индустрије, прописа државе итд.).

**Приоритет** НУ и НП и хитност да се предузме одговарајућа акција. Ове информације представљају субјективну-почетну процену НУ/НП запосленог који га

<sup>18</sup> Слика преузета из рада Vukicevic A. et al. 2019.

је приметио у радном простору. Због тога се одређени приоритет мора доделити након инспекције-увида особе која је прошла обуку БЗР и која је одговорна за управљање БРЗ у радном простору. Осим што ове информације омогућавају приоритизацију задатака, компанија омогућава процену искуства и марљивости запослених на лицу места.

**Опис** НУ и НП омогућава запосленима да дају објективне информације о откривеном безбедносном ризику. Опис може садржати текстуалну или гласовну поруку направљену употребом мобилног уређаја.

Поред главне функционалности, извештавања о НУ/НП, оквир има модул за размену порука који омогућава комуникацију у реалном времену између запослених, менаџера безбедности и инжењера за одржавање. Делегирање задатака и даља преписка извршавају се у облику „тикета“- система за преписку, где инжењери БЗР покрећу и одлучују када се тикет затвара. Преписка почиње након што се извештај о НУ/НП смести у базу података и након што менаџер сигурности преузме обавештење о том извештају. Нотификација укључује прикупљене податке (локацију, врсту, опис и приоритет), које менаџер прегледа и на основу којих бира запосленог или инжењера за одржавање којем жели да додели задатак или послати поруку. Задатак се састоји од детаља-описа НУ/НП, заједно са почетном поруком руководиоца, као и свим даљим порукама које се размењују током напредовања решавања проблема-задатка. На крају, сваки корисник има увид у историју својих активности, док менаџер види сва активна питања и остварени прогрес у извршавању радних задатака.

### 3.4.4 Групе активности за имплементацију предложеног решења

Из перспективе менаџмента МСП, неопходне информације за усвајање оваквог вида дигитализованог решења јесу план и динамика имплементације. Имплементација предложеног решења предвиђа четири групе активности (А) и девет подактивности тј. корака (енгл. Tasks – Т). Целокупан поступак реализације и очекивани исходи сваке од наведених фаза дати су у наставку:

#### *А1 (Прикупљање захтева корисника)*

**Т1.1:** Узимајући разноликост захтева сваког од потенцијалних корисника, потребно је извршити преглед постојећих решења за дати тип предузећа као и преглед индустријских стандарда и доступних услова и потреба у самом предузећу. У овом кораку циљ је обезбедити да разматрано предузеће има инфраструктурне услове и бенефите од коришћења оквира.

**Т1.2:** Потребно је креирати и извести низ упитника и интервјуа са запосленима и одговорнима за безбедност и здравље на раду у датом предузећу. У овом кораку циљ је прецизно идентификовати тренутну праксу и краткорочне и дугорочне потребе предузећа, како би се обезбедило да развијено решење задовољава захтеве актуелне индустријске стандарде. То се постиже скупљањем-предефинисањем НУ/НП од интереса и осталих повезаних параметара који могу бити специфични за радно окружење у предузећу – а које ће бити уграђене у меније развијених апликација.

*Очекивани резултати:* Након завршетка ове фазе, очекује се да су захтеви датог предузећа прецизно документовани. То подразумева да су на основу њих дефинисани UML дијаграми, као и процеси који се могу аутоматизовати прилагођавањем програмског оквира. На основу дефинисаних захтева и увида у тренутну инфраструктуру, дефинишу се и потребе за додатном ИТ инфраструктуром и осталом опремом потребном за интеграцију оквира у радно окружење.

### **A2 (Дефиниција прилагођеног решења)**

**T2.1:** На основу предефинисане листе НУ/НП (у датом предузећу), потребно је дефинисати софтверску архитектуру која је прилагођена условима и потребама у самом предузећу. То укључује прецизирање серверске-стране (енгл. Backend) и корисничке-стране (енгл. Frontend) апликације. Дакле, потребно је прецизирати изглед и функционалности дијалога-радних прозора тако да одговарају захтевима дефинисаним у А1. Овај радни задатак се извршава итеративно, и подразумева кооперацију између задужених за обезбеђивање безбедности на раду и задужених за развој и одржавање информационих система. На тај начин се осигурава да ће развијено решење задовољити потребе предузећа и дефинисане стандарде.

**T2.2:** Врши се дефинисање стратегија тестирања и мерења корисности софтверског система на перформансе предузећа. Након што се утврди очекивани обим података који ће бити прикупљени, потребно је размотрити технике њихове анализе. Доступност довољне количине података отвара могућност примене напредних техника за анализу и идентификацију шаблона појаве НУ/НП скривених у подацима – како би се утврдила њихова корелација са пословим процесима и активностима у области безбедности на раду.

*Очекивани резултати:* У овом стадијуму, подразумева се да је доступна детаљна техничка документација прилагођеног софтверског решења. Заједно са претходно усвојеном листом захтева, техничка документација је довољна за коначну проверу изводљивости, прилагођености и корисности платформе пре него што се крене у имплементацију.

### **A3 (Агилни развој софтверских компоненти)**

**T3.1:** Потребно је развити претходно специфициране модуле и сервисе. Ово подразумева агилни развој: 1) Базе података и пословне логике на серверској страни који ће радити у облаку и 2) Мобилне Андроид апликације која ће бити коришћена за интеракцију корисника са системом. Иницијална препорука је да се за све компоненте користи JavaScript технологија, али је могуће користити и нпр. PHP, Java или C# за серверску страну односно Java, C#, C++ или неку другу технологију за развој корисничке апликације.

**T3.2:** Развој сценарија и скрипти за тестирање.

*Очекивани резултати:* Развијено-функционално решење за колекцију и обраду НУ/НП (укључујући и серверску и клијентску страну система) које су спремне за тестирање у индустријским условима.

### **A4 (Имплементација и тестирање решења у реалним условима - постројењу)**

**T4.1:** Потребно је развијено решење имплементирати-инсталирати у радном окружењу, на локалним серверима и уређајима. То укључује регистровање корисника, додељивање привилегија и остала подешавања.

**T4.2:** Потребно је извршити обуку запослених који ће користити и одржавати предложени софтверски систем.

**T4.3:** Током пробног периода, потребно је пратити прилагођавање запослених на имплементирани систем и његов утицај на безбедност и здравље на раду. Како се прикупљени подаци буду умножавали, потребно је обучити запослене да их употребе за напредну анализу и препознавање шаблона у појави НУ/НП – како би се њихово понављање и узроци елиминисали.

*Очекивани резултати:* Валидиран и функционалан дигитализовани систем за управљање НУ/НП у радном окружењу датог предузећа.

### 3.4.5 Очекивани бенефити

У поређењу са традиционалном праксом, предложено дигитализовано решење доноси бенефите како за запослене тако и за послодавце кроз: 1) Интуитивну и аутоматску идентификацију кључних индикатора перформанси БЗР; 2) Побољшање система генерисања и управљања извештајима; 3) Побољшање свести запослених о безбедности на раду; 4) Повећање укључености запослених и мерење укључености запослених у проактивно повећање безбедности на раду; 5) Развој технологије која би била генеричка-примењива за више предузећа.

**Табела 3.1** Гантограм планираних активности.

Активност (А)	Корак (Т)	Радна недеља																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Прикупљање захтева корисника	1.1	█	█	█	█	█	█	█	█																
	1.2	█																							
Дефиниција прилагођеног решења	2.1			█	█	█	█	█	█																
	2.2																								
Агилни развој софтверских компоненти	3.1						█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
	3.2						█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
Имплементација и тестирање решења у реалним условима	4.1												█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
	4.2																								
	4.3																								

### 3.4.6 План реализације

Укупно трајање имплементације и адаптације предложеног информационог система је шест месеци (24 недеље). Опис сваке од радне фазе описани су у секцији “План за имплементацију предложеног решења у одређеном предузећу“, где је описан сваки од радних пакета понаособ. У овој секцији, ради једноставности, приказан је план активности из радних пакета у форми Гант-дијаграма. Као што се може видети из Табеле 3.1, дефинисани радни пакети су сукцесивни (сваки радни пакет подразумева да је претходни имплементиран). Такође, радни задаци по радним пакетима су дефинисани да се извршавају паралелно. Технички радни задаци, који могу захтевати промену предложеног информационог система и проширивање-програмирање оквира, су Т3.1 и Т4.2.

### 3.4.7 Управљање потенцијалним ризицима

У овом раду предвиђене су три групе ризика (Р1-Р3):

- **Р1 Финансијски буџет и временски рок:** Трајање појединих радних задатака може варирати у односу на предвиђено трајање зависно од комплексности потреба самог предузећа. Такође, информатичка обученост и фамилијарност запослених са актуелним технологијама доста утиче на прогрес и почетак ефективног коришћења. На пример, уколико је фамилијарност запослених са ИКТ технологијама ниска, време потребно за обуке запослених може бити веће од предвиђеног итд.
  - **Санација:** Потребни буџет је максимално редукован коришћењем бесплатних енгл. open-source технологија које су добро документоване – те из тог разлога лако разумљиве потенцијалним корисницима.
- **Р2 Одбојност запослених према мењању тренутне праксе:** Иако тренутна пракса подразумева доста ручног рада, очекивано је да неки од запослених у ланцу обезбеђивања БЗР не учествују активно или не буду заинтересовани за ефективно укључивање предложеног информационог система.
  - **Санација:** Описано решење направљено је након консултација са већим бројем предузећа из околине града Крагујевца. Реализација почиње процесом прикупљања захтева и спецификацијом-прилагођавањем предложеног решења потребама датог предузећа; док се са имплементацијом креће у шестој недељи. На тај начин запосленима-корисницима информационог система је дато простора да утичу на то какво ће њихово решење изгледати.
- **Р3 Компатибилност технологија:** Претпоставка је да постоји варијабилност између технологија заступљених у предузећима (нпр. Linux или Microsoft или iOS оперативни системи), као и њихових верзија. Из тог разлога може постојати ризик од компатибилности предложеног решења у условима дате фирме, иако је дефинисано тако да буде широко примењиво.
  - **Санација:** Потенцијалне некомпатибилности технологија које се већ користе од стране предузећа-корисника су минимизоване реализацијом

предложеног решења као сервис енгл. “software-as-a-service” (SaS). То омогућава да серверски или клијентски део апликације може бити написан употребом неке друге технологије, пратећи предложену архитектуру и пословну логику. На пример, клијентска страна може бити реализована употребом C#, Java или неког другог програмског језика уместо JavaScript.

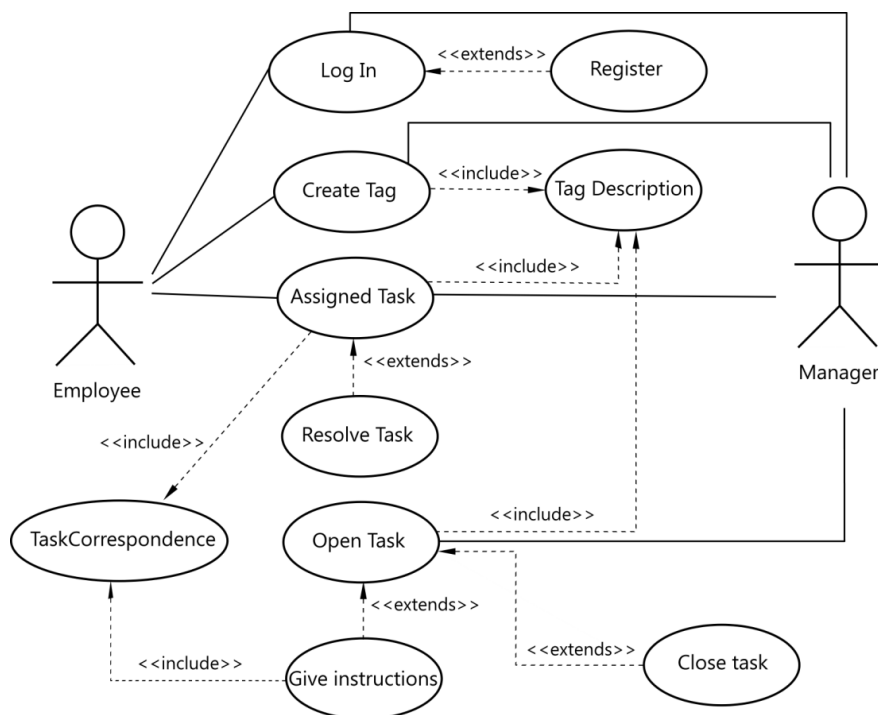
### **3.5. Случај употребе: енгл. Safe-Tag апликације за дигитално прикупљање и обраду извештаја о небезбедним условима и небезбедним поступцима**

Овај одељак илуструје прилагођавање предложених функционалности у произвољном МСП. Због величине компаније (до ~250 запослених) и структуре, тим за управљање БЗР састоји се од запослених и менаџера БЗР. Због тога, менаџер за БЗР игра и улогу инжењера за безбедност и одржавање на лицу места. Општи циљ прилагођеног решења Safe-Tag остаје исти: а) дигитализација система извештавања о безбедности; б) побољшати безбедносну културу и свест запослених о НУ/НП; и в) мери допринос појединаца.

Ток употребе прилагођеног решења дат је на слици 3.7 (Vukicevic A. et al. 2019), док су његови одговарајући менији приказани на слици 3.8 (Vukicevic A. et al. 2019). Корисници приступају систему тако што се пријављују (логују) или захтевају регистрацију. Обе врсте корисника имају следеће функционалности: 1) Извештавање о НУ/НП (функционалност „Create Tag“ на слици 3.8, која је детаљно описана на слици 3.6); 2) Одговарање на додељене задатке („Tasks to do“ на слици 3.8) и 3) Упознавање са својом историјом извештавања и перформансама (карактеристика „Achievements“ на слици 3.8).

Функционалност "Tasks to do" наводи све задатке који су додељени пријављеном кориснику. Дакле, треба изабрати задатак са листе (тј. „Task 2“ на слици 3.8) који треба да се реши, што даље води до прозора кореспонденције (под називом „Resolve Task 2“ на слици 3.8). Прозор за дописивање је један вид енгл. Live chat-а, у којем запослени размењују текстуалне или сликовне поруке у реалном времену (слично друштвеним мрежама). Након што менаџер процени да је задатак извршен, он преписку означава као „Решену“ (енгл. „Resolved“).





Слика 3.7 Енгл. UML Use case дијаграм прилагођене SafE-Tag апликације<sup>19</sup>.



Слика 3.8 „Моск-ир“ корисничког интерфејса за управљање извештајима (у Менаџер моду рада)<sup>20</sup>.

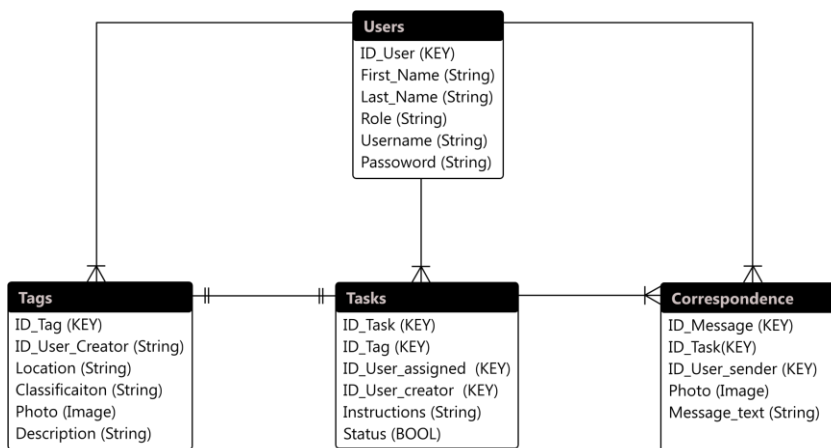
<sup>19</sup> Слика преузета из рада Vukicevic A. et al. 2019.

<sup>20</sup> Слика преузета из рада Vukicevic A. et al. 2019.

Корисник-менаџер (енгл. „Manager“) има додатну функционалност која му омогућава да додељује радне задатке запосленима (укључујући себе) у вези са прикупљеним НУ/НП (функција „Open tags“ на слици 3.8). Једном када се таг (извештај) сачува у централној бази података, корисник-менаџер добија обавештење о томе колико је преосталих „Отворених тагова“. Корисник-менаџер такође може прегледати покренутне радне задатке и тагове (НУ/НП), проверити пружене информације (функција „Info“ на слици 3.8) и доделити задатак запосленом. Додељени радни задатак (прозор „Assign Tag 2“ на слици 3.8) такође подразумева одабир одговорних запослених из падајућег менија и пружање упутства о њиховим даљим поступцима.

### 3.5.1 Дијаграм релација међу ентитетима

Дијаграм релација ентитета описује у каквом су међусобном односу „ентитети“ попут корисника, објеката у бази или концепта у систему. У пракси се најчешће користе за документацију релационих база – како би се у стадијуму пројектовања лакше уочиле и отклониле логичке грешке (које би правиле проблем у фази тестирања). У пројектованом систему постоје четири врсте ентитета: корисници - енгл. Users, радни задаци - енгл. Tasks, НУ/НП-Tags и извештаји - енгл. Reports. Однос између ентитета описан је дијаграмом приказаним на слици 3.9.

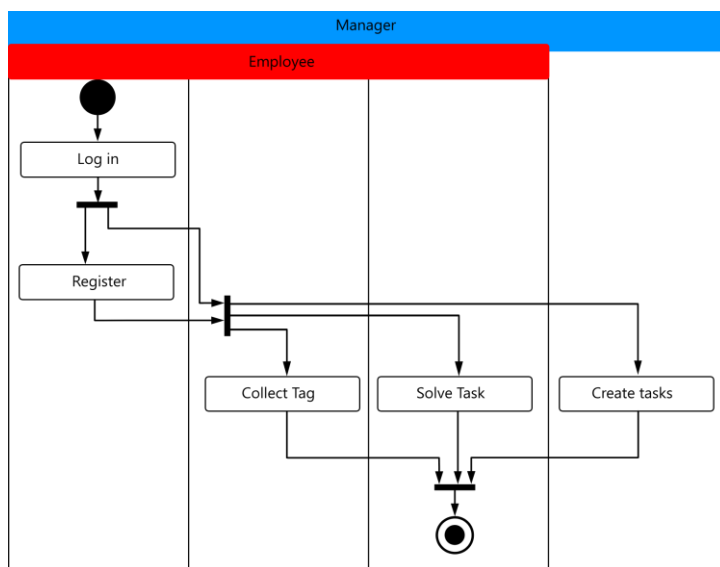


Слика 3.9 Дијаграм релација ентитета у апликацији.

### 3.5.2 Дијаграм активности

Дијаграм активности (енгл. Activity diagram) описује динамички аспект предложеног решења. Као што и само име каже, описује ток извршавања активности у систему. Активност се може посматрати као једна операција коју дати систем извршава. На слици 3.10 приказан је дијаграм тока активности. Интеракција корисника зависи од тога на који се начин логује у систем. Ако је логовање извршено као радник (енгл. Employee), на располагању су му активности креирања извештаја (енгл. Collect tag) и решавања радног задатка (енгл. Solve task). Уколико је корисник улогован као менаџер (енгл. Manager) омогућено му је и да додељује радне задатке (енгл. Create tasks). Са дијаграма се види да систем омогућава

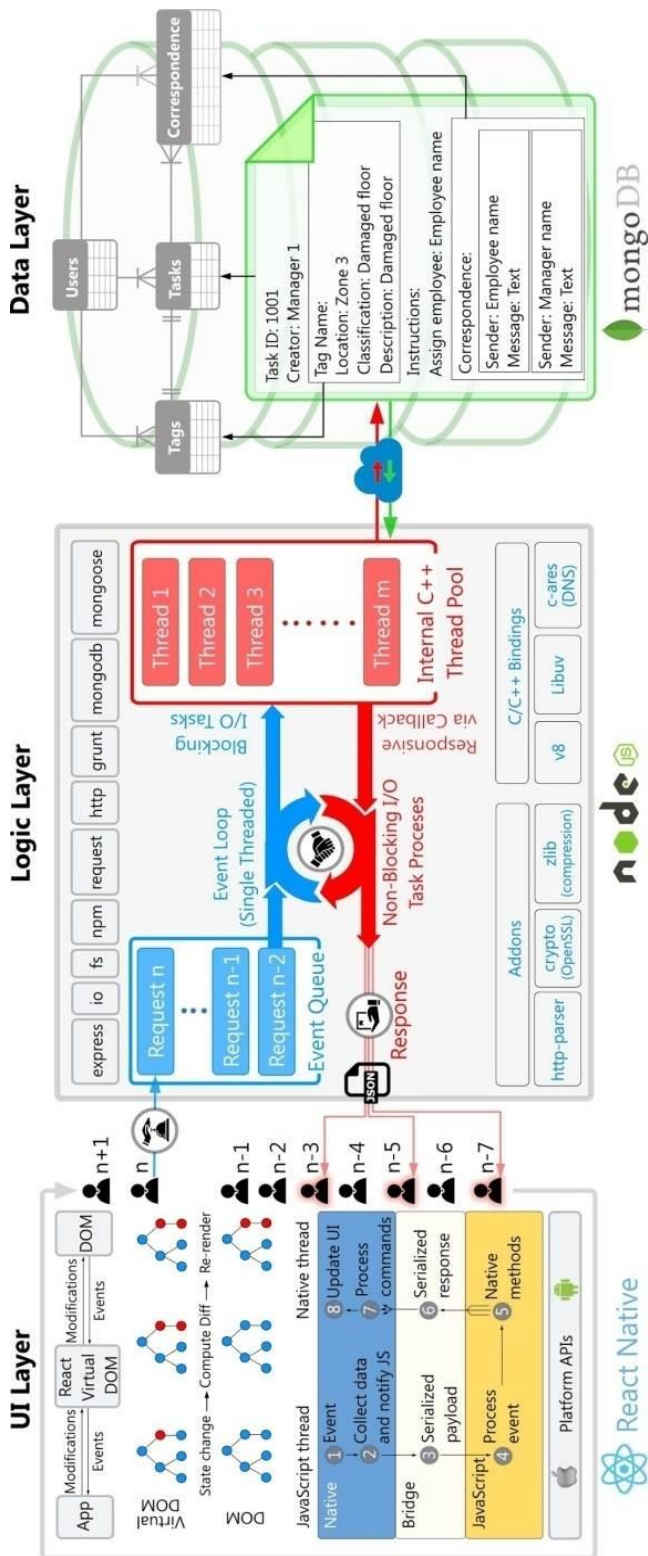
конкурентно-паралелно извршавање све три активности (невезано од тога који их корисник извршава). Свака од три наведене активности има своје “подактивности”, које су на дијаграму изостављене ради прегледности односно зато што су секвенцијалне и претходно описане на сликама где се објашњава дијаграм активности.



Слика 3.10 Енгл. UML Acitivity diagram – Дијаграм активности.

### 3.5.3 Прилагођена софтверска архитектура и предложеног решења

Сврха овог одељка је двострука. Прво, он показује како прилагодити генеричку архитектуру са слике 3.4 да би одговарала потребама описаном МСП. Други, шири аспект, односи се на елаборацију надолазећих трендова Индустрије 4.0 (константно повећавање количине података и умрежених уређаја који требају комуницирати у реалном времену) који утичу и на БЗР 4.0. Као што је видљиво са слике 3.11, у овом раду је предложена употреба низа оквира заснованих на JavaScript (Node.js за бекенд и React Native за фронтенд функционалности), док је Mongo.DB употребљен за имплементацију базе података у облаку. Пошто је употреба ових технологија релативно незаступљена у новијој литератури из области БЗР, у овом одељку ћемо укратко објаснити и оправдати њихове предности за имплементацију предложеног решења за управљање НУ/НП.



Слика 3.11 Прилагођена архитектура (са акцентом на илустрацију предности-својстава коришћених технологија)<sup>21</sup>.

<sup>21</sup> Слика преузета из рада Vukicevic A. et al. 2019.

### 3.5.4 Node.JS веб-сервиси

Node.js је open-source, мулти-платформско JavaScript окружење направљено на врху енгл. Google Chrome JavaScript V8 engine-a, са циљем да омогући извршавање JS кода изван<sup>22</sup> претраживача. Дакле, отворена је могућност коришћења JavaScript-а за имплементирање како фронтенд тако и бекенд стране софтвера у облаку. Овај тренд је познат као парадигма „JavaScript свуда“. Node.js је састављен од низа модула који олакшавају рад са бинарним подацима (баферима), I/O датотекама, умрежавањем (DHC, HTTP, TPC, TLC/SSL или UDP), функцијама за криптовање итд. Коначно, парадигма „JavaScript свуда“ смањује трошкове развоја, јер је потребна експертиза из само једног програмског језика.

Главна предност коју је Node.js донео је начин на који изводи обраду долазећих захтева (енгл. Request) - познат као "неблокирајући I/O" (енгл. Non-blockin I/O). Укратко, традиционални асинхрони приступ за паралелну обраду долазећих веб захтева, ограничен је бројем нити/језгара доступних на серверу. Модел<sup>23</sup> који не блокира I/O користи „петљу догађаја“ (енгл. Event loop) која чува долазни захтев у специфичној структури података развијеној на бази енгл. Queue структуре података и обрађује их на начин који је вођен догађајима (енгл. Evet driven). То значи да су и клијенти и сервер свесни када се захтев шаље и када се његова обрада врши у позадини, тако да су у међувремену обе стране слободне да раде на другим текућим задацима. Једном када сервер обрађује захтев из реда чекања (Queue), кориснику се шаље повратна информација да треба преузети одговор на његов претходно послати захтев. Са становишта<sup>24</sup> малих и средњих предузећа, поред смањења трошкова развоја, Node.js омогућава економично скалирање корисника и долазних захтева (за које се очекује да ће се догодити са растом компаније или удруживањем са другим партнерима).

---

<sup>22</sup> Ово такође укључује приступ фајл-систему, супротно традиционалном извршавању JavaScript кода унутар HTML странице корисниковог веб-претраживача.

<sup>23</sup> Интуитивно објашњење блокирајуће и неблокирајуће обраде веб захтева је упоређивање начина на који се купци опслужују-сервисирају у продавници слаткиша (сви клијенти стоје у једном реду, један радник прима наруџбине једну по једну и даје гостима поручени сладолед) и ресторану (сви клијенти седе за својим столовима док један конобар прима поруџбине; док други радник-кувар паралелно кува у складу с примљеним наруџбинама, док клијенти уживају-не стоје у реду; кувар даје конобарима резултате свога рада, који опет могу паралелно опслуживати више клијената). Може се приметити да је убрзање рада код продавнице слаткиша пропорционално броју радника за пултом, и да би у идеалном случају број радника требало да буде једнак броју клијената у реду - што је скупо. Са друге стране, посао ресторана се знатно боље убрзава са повећањем броја запослених, док привремено и разумно повећање купаца не утиче (не успорава) на течан и непрекидан рад ресторана.

<sup>24</sup> Ограничење објашњеног приступа је у томе што је он од велике користи примарно за апликације које не изводе много калкулација (рачунања), али врше учесталу размену података, порука и другог садржаја између удаљених уређаја (нпр. друштвене мреже).

Функционалност SafE-Tag позадине објављене су као енгл. RESTful веб сервиси, који су имплементирани помоћу http, express и mongoose модула Node.js. Сви подаци пренесени преко креираних веб сервиса у JSON (JavaScript Object Notation) формату. Пошто је JSON једноставан текстуални формат, опште је прихваћен као погодан за размену порука између умрежених корисника. Омогућује ефикасан рад са угњежденим порукама и структурама података које иначе резултују сложеним релацијама у релационим базама. У овој студији JSON је коришћен јер: 1) подаци ће бити сачувани у NoSQL бази података у облаку и 2) клијенти ће на својим паметним уређајима покретати апликације засноване на JavaScript-у који комуницирају преко веб-сервиса.

### 3.5.5 MongoDB NoSQL база података у облаку

Слично као што се, у BigData ери и са константним повећањем броја долазних захтева, на страни сервера појавило уско грло са блокирајућим I/O – традиционални начин организовања података у табеле и релације показао је низ мана. Конкретно, ако постоји потреба да се често приступа великој количини дистрибуираних података, наићи ће се на проблеме са: 1) писањем сложених упита код већег броја повезаних табела и 2) рачунарском снагом утрошеном на обраду велике количине података при проналажењу и придруживању релативно једноставних информација организованих на хијерархијски начин. Интуитивни примери су тзв. постови<sup>25</sup> на друштвеним мрежама - чији је основни ток рада и сврха заправо размена података међу корисницима, слично као и у случају SafE-Tag апликација за управљање безбедношћу на раду. Што је још важније, Mongo NoSQL база података користи JSON формат за чување података, због чега је имплементација ефикасна и једноставна. Конкретно, коришћен је Node.js „mongoose“ модул, који је Node библиотека за моделирање објектних података за MongoDB. За потребе ове студије коришћена је минимална верзија MongoDB у облаку - mLab. Предност mLab јесте смањење потреба за инсталирањем и одржавањем информационог система за чување података, при чему омогућава интуитивно корисничко окружење и пословни модел „плати по употреби“ (енгл. Pay per use) (постоји и опција за бесплатну употребу mLab - ако је реч о малој количини података).

### 3.5.6 React Native корисничка апликација

Кориснички интерфејс је реализован помоћу React.JS оквира. Слично томе, као Node.JS и Mongo.DB, React се појавио као одговор на текући тренд коришћења апликација у реалном времену за ажурирање великих количина динамичких-

---

<sup>25</sup> Саставни делови поста (енгл. Post) на друштвеним мрежама су једноставни подаци (текстуалне поруке, слике, видео снимци итд.) који су дељени и повезани са великим бројем корисника у облику коментара-одговора/акција. Уместо да се тако комплексне релације нормализују у низ табела од којих свака треба имати информације о корисницима и њиховим ID-овима, редувантност коришћених података и сложеност приступа се могу увелико смањити ако се сачувају управо онако како их видимо на HTML страници - у облику хијерархијски организованог документа.

променљивих података. Са техничког становишта, уско грло<sup>26</sup> је у овом случају настало као последица начина на који веб претраживачи исцртавају-рендерују садржај<sup>27</sup> који добијају у текстуалном HTML формату. Као решење, React је предложио коришћење виртуелног<sup>28</sup> DOM-а (енгл. Document Object Model) и алгоритма под називом Дифинг<sup>29</sup> (енгл. Diffing), који ефикасније управља динамичким променама HTML садржаја у поређењу са традиционалним DOM рендеровањем. Након револуције веб развоја, Facebook је прилагодио своју React технологију да ради и на нативним оквирима мобилних платформи (написаних употребом различитих програмских језика: Java или Kotlin за Android, Objective C или Swing за iOS). Супротно традиционалном хибридном<sup>30</sup> приступу, React Native спаја предности развоја React веб корисничког интерфејса са робусношћу нативних API-ја мобилних платформи. То се постиже коришћењем посебног диспечера моста<sup>31</sup> (енгл. Bridge dispatcher). Будући да је имплементиран помоћу C++, мост доноси ефикасност развоја React веб GUI-ја програмерима мобилних апликација. Ово претпоставља коришћење парадигме компоненти и погледа (енгл. Views) да би

---

<sup>26</sup> Интернет претраживачи смештају примљени (учитани) HTML у структуру података налик на стабло (енгл. Tree) под називом Document Object Model (DOM), што омогућава ефикасно приказивање садржаја. Како се сложеност веб страница непрестано повећава, често је потребно ажурирати само мали број садржаја- DOM дела стабла (нпр. један коментар на страници од 10 MB), тако да поновно учитавање и приказивање целе странице због мале промене постаје неефикасно. Ово уско грло постаје још штетније због тренда развоја веб софтвера као једностраних апликација (енгл. Single Page Applications – SPA), када се код читаве апликације налази на једној страници која се динамички мења у зависности од акција које предузима корисник.

<sup>27</sup> Укратко, проблем се појавио са повећањем могућности уређаја да снимају и размењују садржај преко облака, тачније са повећањем количине и величине слика, видео записа и текста који чине садржај данашњих апликација и веб-страница.

<sup>28</sup> Приступ DOM-у и освежавање DOM-а рачунски је мање ефикасан у поређењу са покретањем JavaScript кода. React користи ту чињеницу и ствара JavaScript дупликацију DOM-а на коју би се захтеване промене могле ефикасније применити користећи Diffing алгоритам.

<sup>29</sup> Четири корака дифинг алгоритма су: 1) Комплетни виртуелни DOM се освежава у складу са захтевом корисника; 2) Виртуелни DOM се упоређује са претходним стањем како би се идентификовали измењени чворови структуре података која има облик стабла; 3) Само су измењени чворови освежени у стварној DOM структури података; 4) Прави DOM се исцртава од стране веб претраживача.

<sup>30</sup> Две варијације хибридног развоја мобилних апликација су: 1) Уметање чисте HTML странице у традиционалну мобилну апликацију и 2) Израда JavaScript омота око матичних-нативних оквира. Главни недостатак хибридног приступа су ниже перформансе и потешкоће у раду са карактеристичним-нативним функционалностима мобилних уређаја (нпр. Фајл системом).

<sup>31</sup> Сврха моста је размена података и инструкција између React.JS и нативних компоненти мобилних оквира (слика. 3.11). Догађај на мобилном уређају (нпр. Додир, енгл. Touch) детектује његов нативни оквир, али је он даље серијализован од стране моста и шаље се на извршење у JS делу оквира. Резултати извршавања JS GUI-а се након тога десеријализују и враћају у матични оквир, који рендерује GUI мобилног уређаја.

се GUI поделио на једноставније и независне делове, који би се могли поново користити за развој мобилних или веб апликација.

### **3.6. Дискусија трећег поглавља**

#### **3.6.1 Корисност и значај проактивне идентификације НУ/НП употребом мобилних уређаја**

У тренутној фази транзиције ка Безбедности 4.0, постоји тенденција да се традиционални папирни извештаји БЗР замене апликацијама и сервисима заснованим на облак-технологији (Vadri et al. 2018). Полазиште ове студије била је чињеница да су паметни телефони (и мобилне апликације) током последње деценије преузели доминацију над персоналним рачунарима у готово свим областима живота и пословања; тако да мобилни уређаји постају главни алати које људи користе за интеракцију са вебom (облаком). У том смислу, масовнија примена мобилних и паметних уређаја у БЗР се тек очекује и сматра се да ће се све више користити у пракси. Што се тиче сајбер-сигурности, која је главна брига у вези са коришћењем паметних уређаја у управљању БЗР, сматра се да коришћење приватних паметних телефона на радном месту може да створи ризик (Lee J. et al. 2015; Savaliya P.V. et al. 2015). У складу са тим, препорука је: а) поставити неколико паметних уређаја на одговарајућа места у радном простору, како би запослени могли да им приђу и користе их; или б) укључивање додатне софтверске заштите како би запослени могли да користе апликације попут Safe-Tag само ако су пријављени да се налазе на радном месту.

#### **3.6.2 Флексибилност и изводљивост решења базираног на JavaScript технологијама**

Након елаборације предности предложеног решења, са И4.0 и БЗР гледишта, у овом одељку ће бити појашњене предности предложеног оквира са гледишта управљања (софтверским) пројектима. Ово укључује анализу трошкова и сложености развоја, прилагођавања и одржавања предложеног решења. Као што је приказано у одељку 3.6, целокупно решење је објављено коришћењем добро документованих и *open-source* технологија, што значајно смањује сложеност (потребна је експертиза из једног програмског језика – JavaScript-а) и трошкове<sup>32</sup> развоја. Наиме, процена је да се минимално функционална апликација може развити за неколико недеља од стране искусног програмерског тима. То је зато што React Native омогућава корисницима да развију апликацију и саставе је за више платформи (iOS, Android). Штавише, компоненте React GUI написане за мобилне апликације могу се поново користити за, нпр. за развој веб апликације компаније - и обрнуто (постојећа веб апликација се може прилагодити да ради на телефону).

<sup>32</sup> У поређењу са изворним програмским језицима, процењује се да коришћење React Natie смањује време потребно за развој мобилних апликација до 30-40%. Важно је напоменути да је последица овог избора да се не може користити апсолутно потпуни списак нативних функционалности мобилних платформи, што је у већини случајева одговарајуће и компромисно решење.



Организација и начин размене података између корисника је још један важан аспект ка достизању Безбедности 4.0. Поред лакше израде базе података (коришћењем JSON нотације), NoSQL олакшава писање (програмирање) упита за приступ подацима извештаја путем RESTful веб сервиса. У поређењу са алтернативним *бекенд* технологијама (Java, PHP, C#), Node.js је лакше и ефикасније решење за брз развој прототипа производа. Уз то, Node.js има веома једноставан поступак *билдовања* и што је најважније, састоји се од низа модула који олакшавају хостинг веб апликације, писања упита над базама података и усмеравање-рутирање веб страница. За крај, треба истакнути компатибилност и скалабилност предложених технологија као кључну предност за решавање разматраног проблема извештавања и управљања НУ/НП.

### 3.6.3 Даља аутоматизација и укључивање пословне интелигенције у оквир

Као што је споменуто у уводу, подаци се сматрају „нафтом“ 21. века. Иако је главна сврха апликације прикупљање и управљање извештајима, следећи корак који је потребно направити на основу тих података јесте доношење одлука. Што се тиче БЗР и НУ/НП, вештачка интелигенција би се могла употребити за аутоматизацију процеса доношења одлука и откривање скривених образаца из прикупљених извештаја. Под претпоставком да корисник оквира има основно разумевање о AI и JS програмирања, вреди поменути да многи најсавременији AI оквири обезбеђују JS оквири (TensorFlow.js, Keras.js, Brain.js, ML.js, Node-Weka.js и др.). То олакшава интеграцију различитих AI функционалности у предложени оквир у поређењу са алтернативним језицима на страни сервера (тј. C #, PHP или Java).

### 3.6.4 Закључак трећег поглавља

Смањивање броја повреда и несрећа на раду све до нуле представља важан циљ данашње индустрије. Овај циљ би се могао постићи само проактивном идентификацијом претходника незгода на раду - попут небезбедних услова и небезбедних поступака. Нажалост, традиционални приступи (ручно попуњавање и праћење извештаја о НУ и НП) показали су озбиљна ограничења у достизању циља „нула повреда“. Иако постоји низ комерцијалних решења на ову тему, њихова употреба међу малим и средњим предузећима остаје компликована због низа фактора (укључујући цене, прилагодљивост и друге препреке). С друге стране, већина решења представљена у научној литератури није јавно доступна, тако да њихова примена остаје занемарљива у индустријској пракси.

Започета као иницијатива истраживача и привреде, ова студија је предложила нови JavaScript оквир за управљање НУ/НП у БЗР помоћу мобилних уређаја. Примарно, Safe-Tag је описан и образложен тако да илуструје предности које могу бити од користи за мала и средња предузећа која би га прихватила. У поређењу са тренутном праксом, предложени оквир може донети користи и запосленима и послодавцима кроз: 1) идентификацију кључних показатеља перформанси безбедности; 2) дигитализацију и побољшање постојећих система извештавања о

безбедности; 3) побољшање безбедносне културе код радника; 4) боље разумевање и мерење доприноса радника у побољшању безбедности на раду.

## **4. Димензиона контрола екструдованих гумених профила**

### **4.1. Дигитализација фабрика, значај и повезаност са разматраним проблемом**

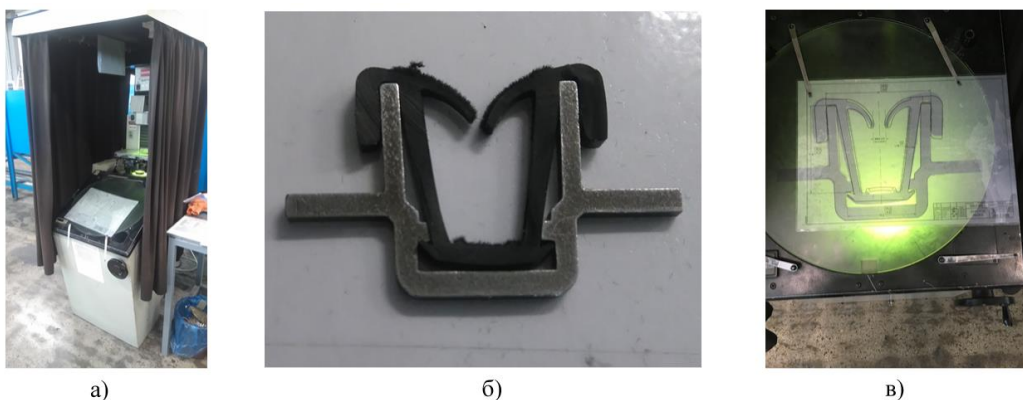
Дигиталне фабрике су концепт производње у коме су компјутеризоване (или компјутерски дизајниране) машине интегрисане са циљем да се потпуно аутоматизује управљање производним процесом. При томе, производни процес укључује истраживање, развој, планирање производње, производњу, тестирање и контролу, одржавање, малопродају и продају. Предмет рада у овом поглављу јесте контрола квалитета, са нагласком на дигитализацију димензионе контроле екструдованих гумених профила. Екструзија и обрада гумених профила је веома сложен процес, који се састоји из низа сукцесивних корака (Rauwendaal С. 2019), који у овом раду неће бити излагани и разматрани детаљно, већ ће фокус бити на процесу визуелне контроле квалитета екструдованих гумених профила. Конкретно, акценат ће бити на развоју методологије која би омогућила да се дигитализује поменути део производног процеса. Једна од актуелних области науке која се намеће као могуће решење јесте машинска визија (или компјутерска визија, енгл. Computer vision) – која подразумева развој метода и алгоритама за доношење закључака на основу компјутерске обраде и анализе дигиталних слика. Методе компјутерске визије константно напредују и налазе све ширу примену у различитим областима науке и привреде. Неки од примера успешне примене машинске визије јесу аутоматска детекција лица на дигиталним фотоапаратима и сликама, аутоматска детекција аутомобилских регистарских таблица па све до аутономних возила и робота (Garibotto G. et al. 2013). У наредним поглављима биће детаљније описана тренутна пракса контроле екструдованих гумених профила и анализа потреба индустрије – са циљем идентификације потенцијала и начина примене машинске визије за побољшање перформанси процеса контроле квалитета.

### **4.2. Тренутна пракса инспекције екструдованих гумених профила**

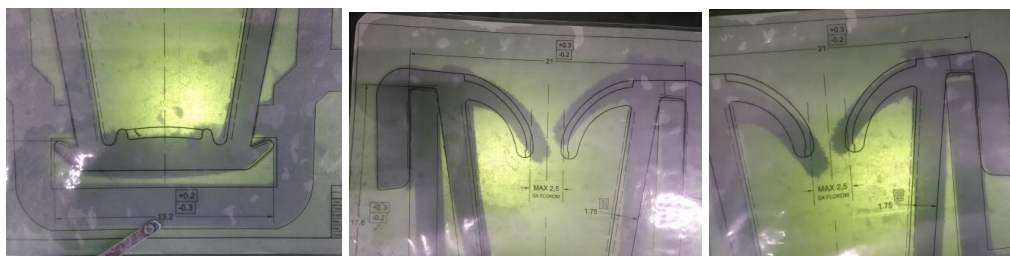
Контрола квалитета (квантитативно испитивање прецизности произведених гумених делова) је веома захтеван процес, како за човека, тако и за рачунарске системе. Главни разлог је чињеница да је гума веома флексибилан материјал, тако да се мора довести у референтни положај да би се извршило директно мерење-поређење са пројектованом геометријом/обликом. У овом раду, фокус је на гуменим профилима – тзв. „кедерима“, произведеним за потребе аутомобилске индустрије. Од неколико десетина профила доступних на тржишту, одабран је U-профил као репрезентативан проблем за развој и тестирање дигитализованог система који може побољшати тренутну праксу.

На слици 4.1 је приказана мануелна, тренутно заступљена, контрола гуменог профила. У ове сврхе користи се уређај под називом "профил-пројектор" (слика 4.1-а). Профил-пројектор пројектује сенку гуменог профила (слика 4.1-б) на технички

цртеж одштампан на паус папир (слика 4.1-в). Предност описане мануелне методе је што се оператеру омогућава брз и интуитиван увид у димензије произведеног профила. Међутим, да би се гумени профил довео у предвиђени-референтни радни положај, потребно је монтирати га на специјално направљени метални носач. Као што се може видети са слике 4.2, чак и након постављања гуменог профила на метални носач, због флексибилности гуме, тешко је прегледати све делове профила одједном. Уместо тога, оператер мора ручно поставити паус папир на различите саставне делове профила (у конкретном примеру то су: постоље, врат и перо) како би утврдио да ли постоји одступање или не (слика 4.2). Запажена одступања од предефинисаних толеранција која оператер уочи се евидентирају у папирном облику, који се купцу достављају као документација заједно са испитиваним профилем (слика 4.3).



**Слика 4.1** Визуелна инспекција гумених профила помоћу профил-пројектора. а) Изглед уређаја; б) Изглед металног носача; в) Изглед пројектоване сенке (силуете гуменог профила) на техничком цртежу одштампаном на паус папиру.



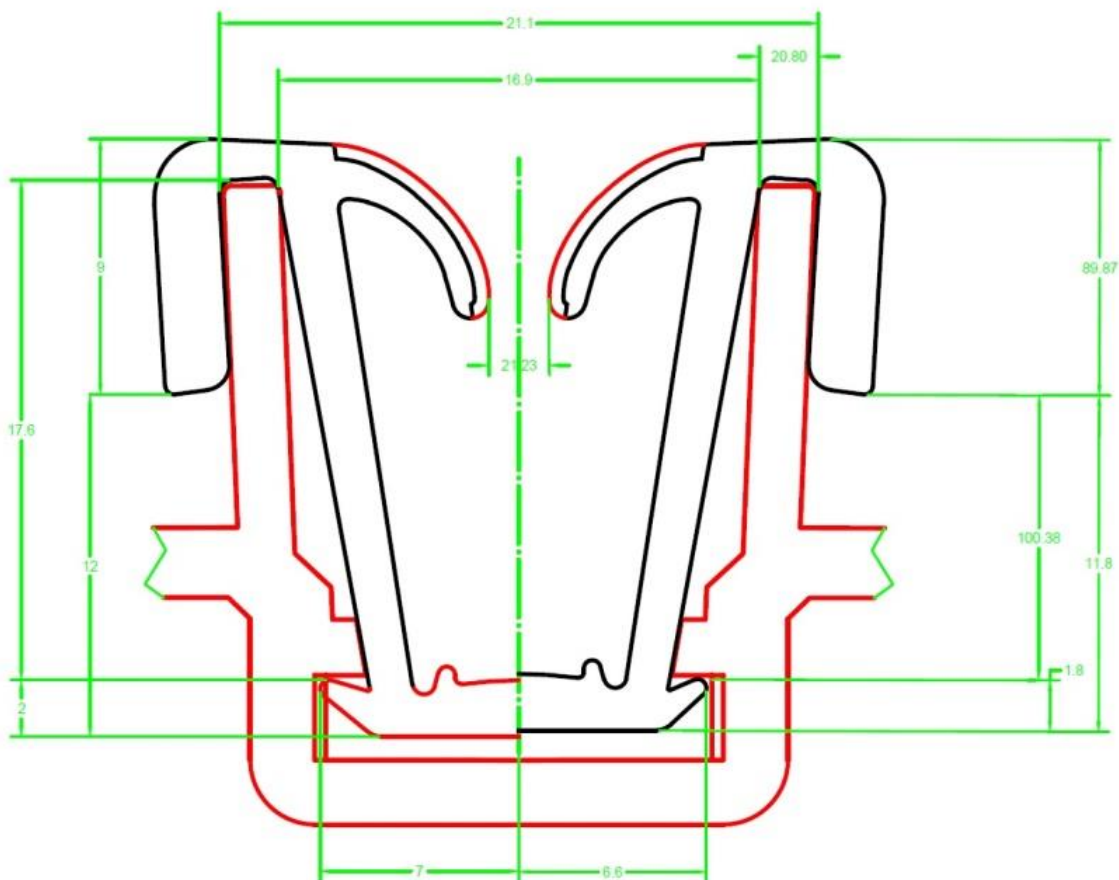
**Слика 4.2** Инспекција базе, врата и пера разматраног U-профила се изводи померањем и позиционирањем паус папира на сенку-силуету коју прави профил пројектор.



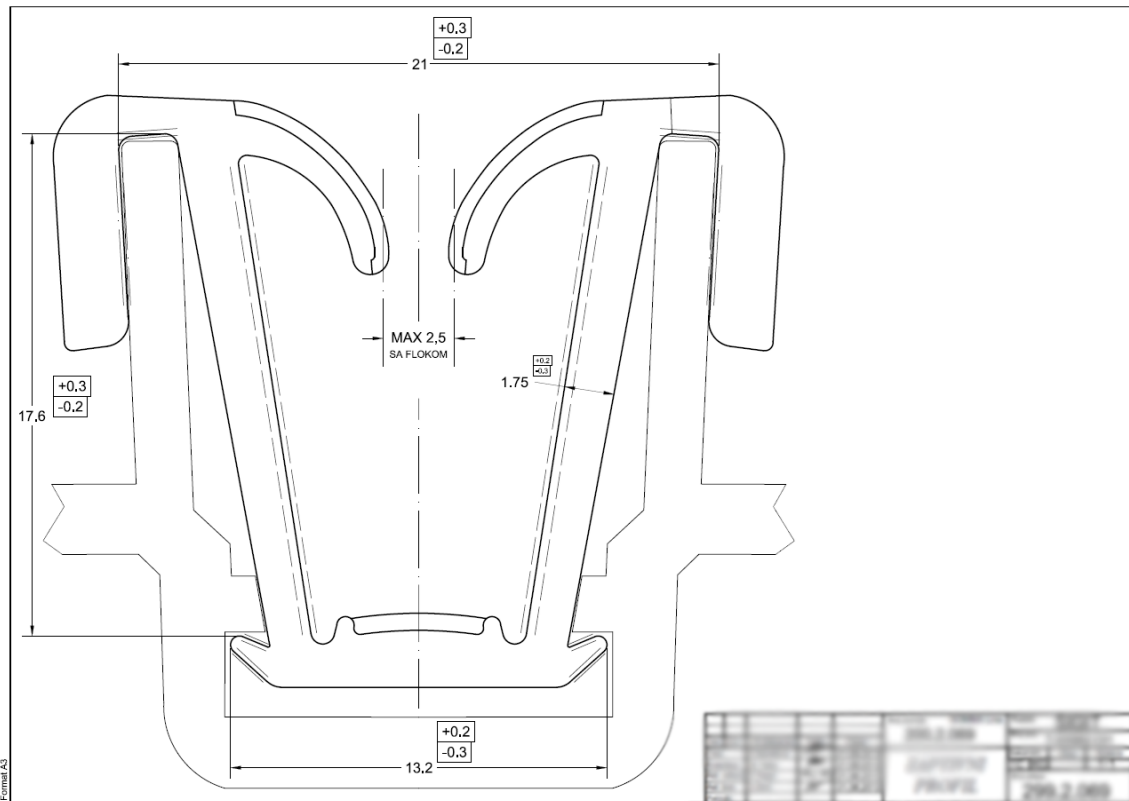
*Слика 4.3 Пример попуњеног извештаја контроле квалитета.*

### 4.2.1 Профил и носач разматраног профила

Главни делови разматраног профила су: база, врат и перце. Димензије профила и носача приказане су на слици 4.4, а димензије које оператер треба проверити приказане су на техничком цртежу приказаном на слици 4.4 Задатак запослених у контроли квалитета јесте испитивање одступања дужине и дебљине три основна дела гуменог профила од пројектованих димензија.



Слика 4.4 Димензије гуменог профила и његовог металног носача (црвена боја).



*Слика 4.5 Технички цртеж са назначеним толеранцијама. Приказани цртеж се штампан на паус папир, који се користи приликом димензионе контроле на профил пројектору.*

#### 4.2.2 Потребе индустријске праксе и недостаци тренутне-мануелне инспекције

Са становишта менаџмента контролом квалитета, недостаци описане тренутне праксе су:

- Време потребно за преглед једног пресека траје од пола минута до два минута, у зависности од искуства оператера.
- Примећена је велика варијабилност мерења (варирање прецизности од оператера до оператера). Наиме, ако један оператер два пута постави исти профил на носач и изврши мерење, може се догодити да гумени профил заузме другачији положај, што негативно утиче на поузданост и поновљивост резултата.
- Тешко је проверити исправност самог поступка мерења. Пошто се мерење заснива на ручном позиционирању паусовог папира на пројектовану сенку профила, менаџменту контроле квалитета недостају информације о времену и ефикасности процеса – из тог разлога, било би веома корисно да се свако

мерење забележи у облику слике, тако да оператери који недовољно прецизно раде свој посао могу бити упозорени или додатно обучени.

- Прикупљање извештаја заснива се на традиционалном-папирном формату (слика 4.3). Дигитализацијом процеса димензионе инспекције профила и пратећих извештаја омогућило би се менаџменту да брже и лакше управља обимном документацијом.
- Подразумева се да неће бити никаквих промена у производној линији и процесу производње нити у процесу контроле квалитета. Овај захтев се може објаснити чињеницом да произвођачи и добављачи обично потписују уговоре са купцима који су написани у складу са индустријским стандардима, тако да прецизно дефинишу процес производње, контроле и документације која треба бити достављена заједно са испорученим производима.
- Решење треба развити тако да се избегне употреба скупе опреме (напредних индустријских камера са пратећим софтвером који коштају више десетина хиљада евра).

### 4.3. Преглед приступа за димензиону анализу производа

Према дефиницији, верификација димензија производа подразумева проверу димензија и толеранција дефинисаних пројектном и техничком документацијом. Тип димензионе контроле коју је потребно извести за дати производ зависи од више фактора, попут:

- Степена прецизности,
- Да ли се објекат инспекције сме и/или може додиривати у процесу мерења,
- Материјалне и површинске карактеристике објекта испитивања,
- Видљивост и провидност објекта који се испитује.

У складу са овим параметрима, мерни уређаји могу бити:

- Ручни алати су основни и широко доступни, користе се у многим ситуацијама јер задовољавају опште-основне критеријуме у пракси. Примери ових алата јесу помично кљунасто мерило, микрометри, мерне траке и др.
- Пнеуматски мерачи су алати који раде на бази компресије и рестрикције протока ваздуха – тако што смањење протока ваздуха или притиска доводе у корелацију са димензијама (обично унутрашњег или спољашњег пречника неког отвора). Овакви уређаји омогућавају бесконтактно мерење, брзи су и углавном служе за мерење са толеранцијама од 0.1 милиметара и мањим.
- Координатне мерне машине варирају од мањих и портабилних уређаја до веома великих машина које заузимају целе просторије и захтевају специјалне услове за рад. У већини случајева, контактна сонда је програмирана или се ручно наводи све док сензор силе/додира не детектује контакт са површином која треба бити измерена. Централни рачунар машине затим врши



конверзију помераја у више-осни координатни систем у коме је потребно направити извештај. Цене, потребан простор, брзина рада и прецизност ових уређаја варирају. Без обзира на то, битно је нагласити да поједини уређаји коштају и преко милион евра и служе за високо прецизна мерења и калибрацију других мерних уређаја. Пошто раде на принципу детекције контакта, нису препоручени за мерење савитљивих и еластичних делова (али постоје и бесконтактне сонде које компензују тај недостатак).

- Оптички мерни системи такође варирају по димензијама, карактеристикама, прецизности. Раде на принципу употребе светла и оптике, на основу којих се софтверски добијају удаљеност или позиције објекта мерења у простору. Погодни су за поређење и налажење одступања од пројектованих тродимензионалних облика – посебно за закривљене и комплексне делове.

*Слика 4.6 Пример оптичких уређаја<sup>33</sup>.*



BLAZE 600M, HEXAGON



K6000, Nikon



COPI, HGH SYSTEMES INFRAROUGES

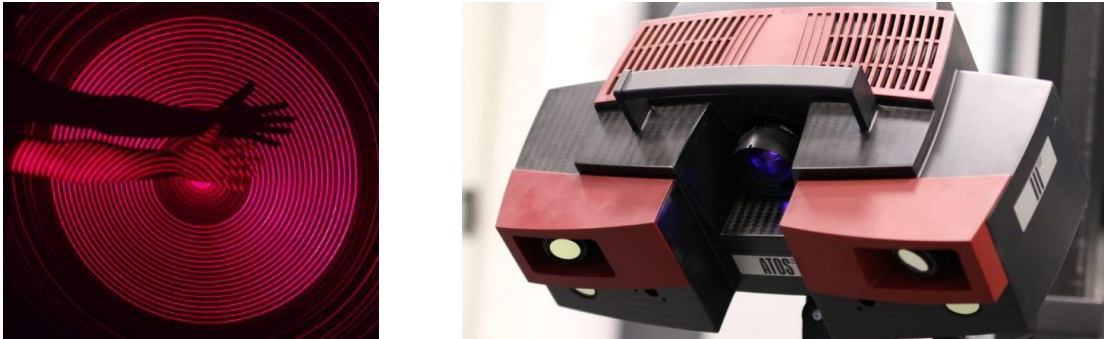


Ovio-optics

- Мерни системи базирани на структурном светлу користе енгл. LED или ласерски-базирану триангулацију дела који се мери. Принцип рада је

<sup>33</sup> Сlike су преузете са <https://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/optical-measuring-system-95873.html>.

приказан на слици 4.7. Скенер за реконструкцију као улаз узима низ слика са различитим шаблонима-линијама које ласер пројектује – а резултат је облак тачака у тродимензионалном простору.



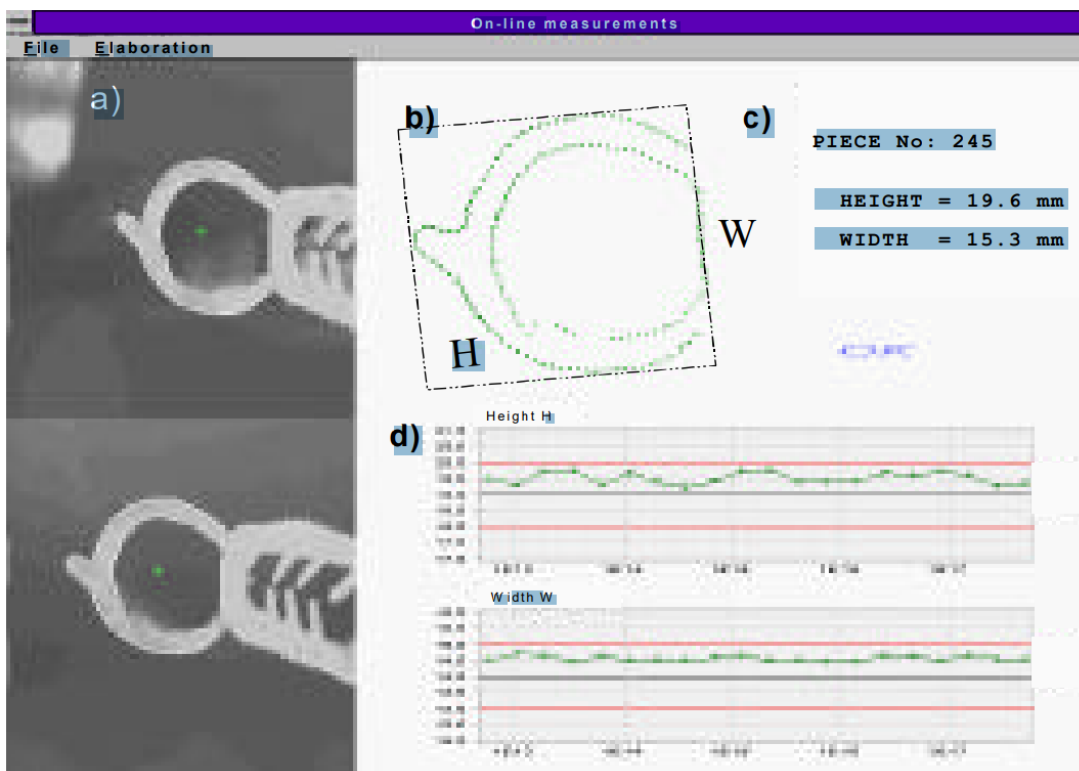
**Слика 4.7** Мерни систем базиран на структурном светлу (слика лево) и уређај Atos (Gom) који се широко користи у аутомобилској индустрији<sup>34</sup>.

- Системи базирани на визији користе енгл. Charge-coupled device (CCD), различите објективе, осветљења и алгоритме који анализирају добијене слике у високој резолуцији. Пошто је развој оваквог система предмет рада ове студије случаја, у наставку ће бити изложен детаљан преглед литературе фокусиране на димензиону анализу екструдованих гумених профила.

<sup>34</sup> Слика десно је преузета са <https://topomatika.rs>.

#### 4.4. Преглед научне литературе

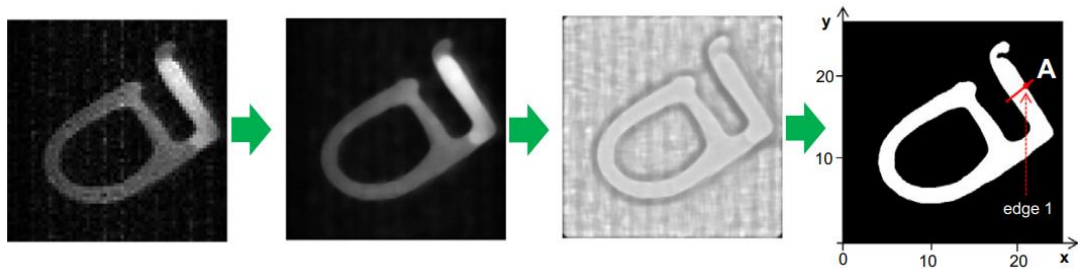
Доступни научни радови на тему димензионе контроле гумених профила углавном су фокусирани на профиле једноставнијег облика и коришћењу сложених система. Liguori et al. развили су стерео систем који омогућава тродимензионалну реконструкцију профила на основу коришћења дводимензионалних слика прикупљених са више индустријских камера и специјалног илуминатора светлости (Liguori C. et al. 2001).



Слика 4.8 Кориснички интерфејс у раду Liguori et al. 2001<sup>35</sup>.

У студији Perlo et al. коришћена је посебно развијена апаратура базирана на употреби магнетне резонанце, која, када се монтира на производну линију, омогућава прецизно одређивање и мерење пресека екструдованог профила (Perlo J. et al. 2016). Предност развијене методе јесте увид у унутрашњост профила (густина, запремински дефекти и шупљине), али је знатно скупља и има нешто мању резолуцију од оптичких метода (64x64 пиксела).

<sup>35</sup> Аутори су предложили методу која користећи две камере и илуминатор светлости детектује ивице профила (употребом Кенијевог детектора ивица – које се затим користе за процену димензија приказаних на слици).



Слика 4.9 Приказ резултата изложених у раду Perlo et al. 2016<sup>36</sup>.

Karunasena и Wickramarachchi предложили су систем заснован на употреби камера и ласера, који је дизајниран за контролу једноставних - правоугаоних профила (Karunasena С. 2010).

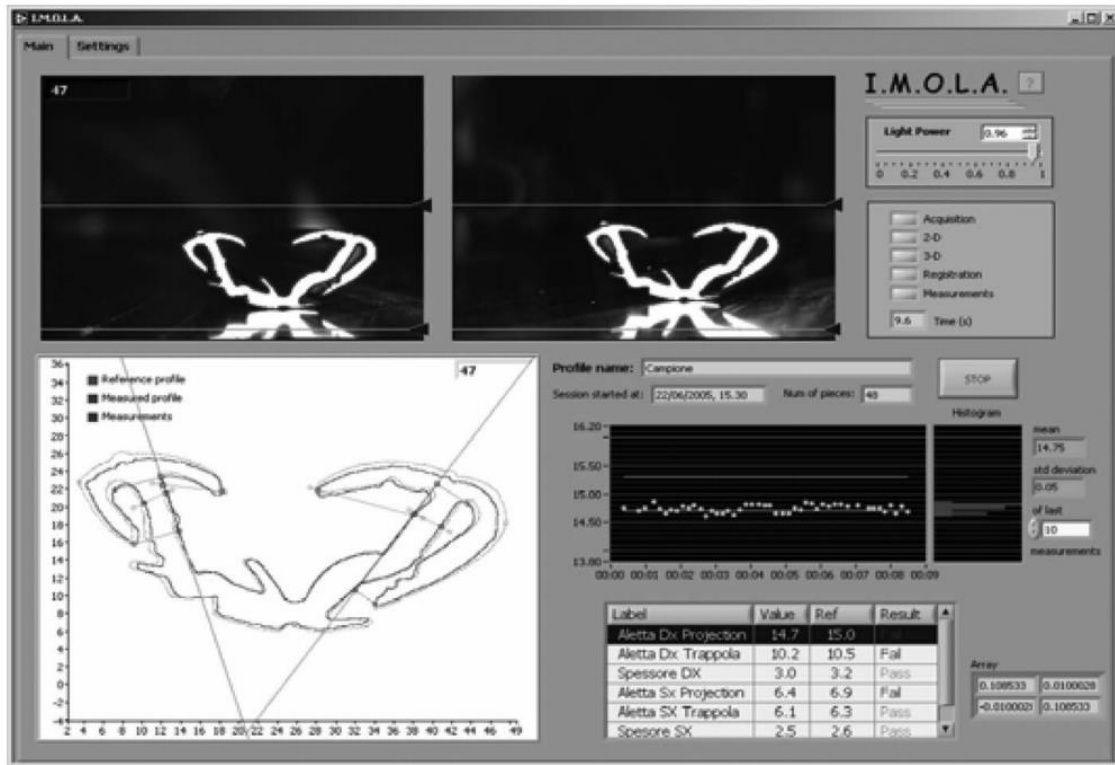


Слика 4.10 Изглед корисничког интерфејса приказаног у раду Karunasena и Wickramarachchi 2010.

Anchini et al. су такође предложили систем заснован на употреби две камере и светлосног илуминатора, који је окарактерисан као поуздан само за контролу

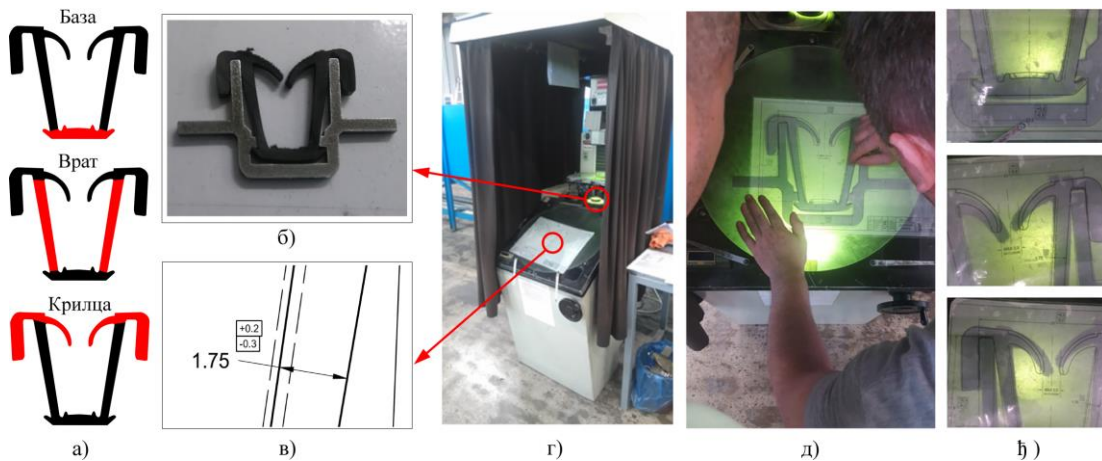
<sup>36</sup> Прва слика представља резултат аквизиције добијене употребом магнетне резонанце. Друга слика представља резултат интерполације и филтрирања оригиналне слике. Наредна слика је резултат локалне нормализације, док последња слика представља крајњи исход (детектовану структуру са назначеном ивицом од интереса).

профила правилних облика, док је за У-профил развијен посебан софтверски пакет за полуаутоматску инспекцију (слика испод) (Anchini R. et al. 2009).

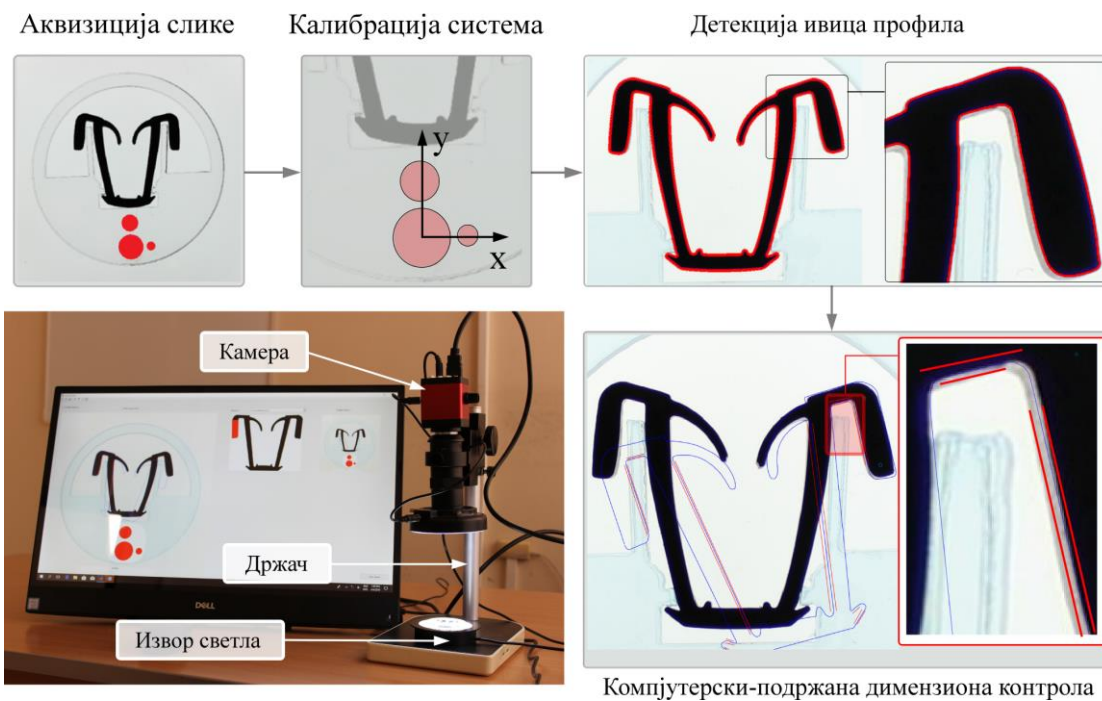


Слика 4.11 Изглед корисничког интерфејса приказаног у раду Anchini et al. 2009.

На основу разматране литературе и тренутних потреба у индустрији, може се закључити да постоји потреба за даљим усавршавањем и аутоматизацијом процеса контроле и инспекције екструдованих гумених профила. Поред тога, посебан нагласак треба ставити на једноставност и могућност примене самог система у пракси - тако да се не нарушавају успостављени и стандардизовани производни процеси и процеси контроле квалитета. Из овог разлога, циљ рада је развити систем који би функционисао на основу коришћења једне камере (јер је пресек профила дводимензионалан). Такође, посебна пажња посвећена је развоју методе која ће се користити као подршка тренутној пракси у разматраној студији случаја.



**Слика 4.12** Димензиона контрола екструдованих гумених профила. а) Саставни делови разматраног профила; б) Гумени профил монтиран на металном носачу; в) Део техничког цртежа са фокусом на толеранције које је потребно проверити; г) Профил пројектор; д) Ручна контрола димензија; е) Преглед специфичних делова померањем техничког цртежа преко пројектоване силуете профила.



**Слика 4.13** Концепт решења за димензиону контролу екструдованих гумених профила.

### 4.5. Преглед предложеног решења

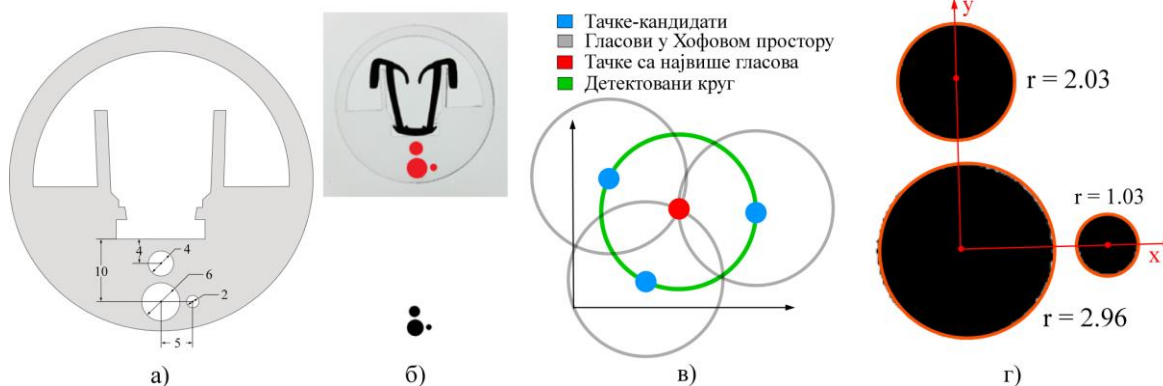
Процес који је потребно дигитализовати приказан је на слици 4.12. Предложено решење и његов ток рада (употребе), приказани су на слици 4.13 и објављени су у раду (Vukicevic et al. 2019б). Као што се може видети, заснован је на низу



сукцесивних корака који укључују: 1) аквизицију слике (одељак 4.5.1), 2) калибрацију система (одељак 4.5.2), 3) сегментацију профила (одељак 4.5.3) и 4) инспекција специфичних делова профила (одељак 4.5.4). У наставку, сваки од наведених корака биће детаљно описан.

#### 4.5.1 Аквизиција слике

Опрема која се користила за развој и евалуацију предложеног поступка приказана је на слици 4.13. Укључује следеће компоненте: DELL Inspiron 3477 all-in-one touchscreen рачунар (конфигурација Intel i5-7200U, 8GM DDR4 RAM) и камеру марке Eakins која у једној секунди може да прикупи 60 слика резолуције 1280x720 пиксела. Као што се види на слици, камера је фиксирана на постољу. Камера је повезана са рачунаром преко HDMI-USB конекције, који пружа слику са фокусом на гумени профил. Сам гумени профил је монтиран на носач и постављен је изнад извора константе светлости (LED). Идеја је да оператор користи екран на додир како би у реалном времену преконтролисао гумени профил. Дакле, димензиона контрола врши се кроз интеракцију са једноставном софтверском апликацијом, чији је кориснички интерфејс приказан на слици 4.13.



**Слика 4.14** Носач профила и калибрација система. а) Димензије носача од плексигласа; б) Детектовање црвених калибрационих кругова; в) Откривање калибрационих кругова помоћу Хофове-ове трансформације; г) Резултати калибрације.

#### 4.5.2 Калибрација система

Сврха калибрације јесте одредити величину пиксела слике у милиметрима и положај локалног координатног система, чиме се уједно одређује и оријентација посматраног профила. Величина пиксела процењена је коришћењем микроскопског калибрационог лењира. Да би се олакшала процена положаја локалног координатног система, непровидни метални носач је замењен са провидним носачем профила направљеним од плексигласа, који има три црвена круга различитих радијуса (слика 4.14-а). При томе, претпоставља се да највећи круг означава средиште локалног координатног система, док најмањи и средњи круг означавају правце X и Y оса, респективно.

##### Детекција калибрационих кругова

Чињеница да су калибрациони кругови црвене боје олакшава њихово детектовање. Пошто су слике смештене у енгл. RGB матрицама у рачунарској меморији (Wilhelm B. et al. 2013), црвени кругови су одвојени од остатка слике одабиром R-канала и применом једноставног *трешхолдинга* (занемаривањем вредности мање од задате вредности; слика 4.14-б доле). Након тога, положаји и величине кругова одређени су помоћу Хофове кружне трансформације<sup>37</sup> (ХКТ) (слика 4.14-в) (Mukhopadhyay P. et al. 2015). ХКТ је робусна метода која може открити центроиде и радијусе кружних објеката под присуством шума или приликом преклапања круга са другим објектима. Робусност ХКТ произилази од чињенице да Хофов алгоритам налази центроидне кандидате *гласањем* у такозваном Хоф-овом параметарском простору - и избором кандидата са максималним бројем гласова. Конкретно, гласање је базирано на употреби једначине  $(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2$  за тражење центроида, при чему су параметри (a, b) координате центроида и r је полупречник круга кандидата. Ако је тачка (x, y) на обиму круга, онда она задовољава претходно поменути однос.

### Одређивање локалног координатног система и величине пискела

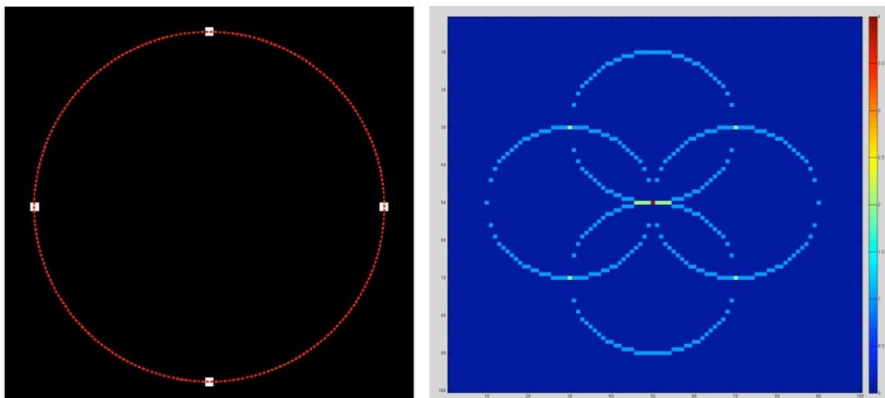
#### <sup>37</sup> Теоретске основе Хофове трансформације:

У дводимензионалном простору једначина круга може се записати као:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2$$

где су (a, b) координате центра круга и r је полупречник круга. Ако је тачка у равни (x, y) и на ободу круга, тада задовољава претходно поменути релацију. Параметарски простор у коме се налази тачка има три димензије (a, b, r), тако да свака тачка у 2D простору одговара кругу дефинисаном у Хоф-овом простору. Ако је граница дефинисана унутар круга коме припадају тачке, претрага у Хоф-овом простору своди се на дводимензионални простор следећим алгоритмом:

1. Издвојити-детектовати ивице на слици помоћу неког од оператора за детекцију ивица (нпр. енгл. Canny).
2. За сваку тачку на слици у 2D простору гласати за тачке које се налазе на обиму круга у Хоф-овом простору.
3. Сабрати све гласове у Хоф-овом простору (слика десно).
4. Издвојити тачке са екстремним вредностима (највећим бројем гласова) у акумулационој матрици (црвена тачка у средини – скала (боја) на слици указује на број гласова).

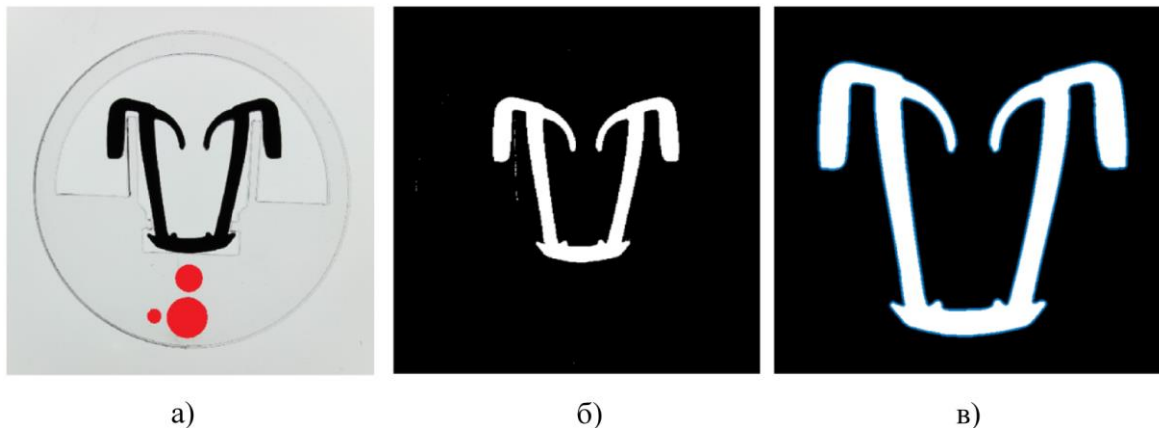




Након детекције калибрационих кругова, идентификација локалних координата профила врши се једноставним сортирањем. Средишњи део круга са највећим радијусима одговара центру координатног система, док центроид најмањег круга одговара смеру X, а средњи круг одговара Y смеру (слика 4.5.1.1-г). Пошто је величина пиксела претходно позната, коришћена је за процену тачности предложеног поступка. Добијени резултати показали су да предложени поступак резултује грешком од  $\sim 0,05\text{mm}$  (разлика измереног и стварног радијуса), што је прихватљиво јер су толеранције биле у границама од  $+0,3$  и  $- 0,2\text{mm}$ .

### 4.5.3 Одређивање контуре профила

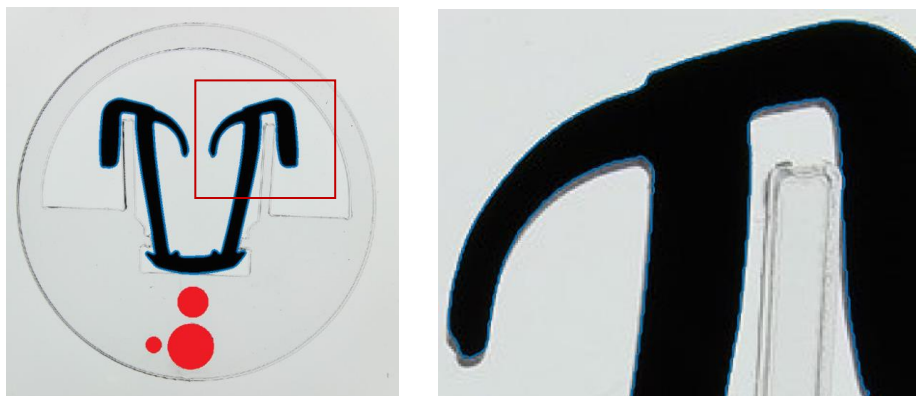
Детекција контуре укључује издвајање гуменог профила од остатка слике и идентификацију контура - како би се даље извршило квантитативно упоређивање њихове димензије са пројектованим димензијама са техничког цртежа. Елиминација црвених калибрационих кругова на слици 4.5.3.1-а је једноставна, јер је познато да су вредности њихових пиксела на R каналу приближно једнаке јединици, а друга два канала су приближно једнака нули. Једноставним *трешхолдингом* могуће је елиминисати све пикселе нијансама које нису потпуно црне боје. На тај начин се добија слика 4.5.3.1-б, где видимо заостали шум изазван рефлексијом светлости кроз ивице носача направљеног ласерским сечењем плексигласа. Овај проблем се решава елиминацијом свих белих регија које садрже мање од 500 пиксела. Координатни облик контуре профила приказаног на слици изводи се израчунавањем градијентата слике (Сану Ј. 1986), након чега се, почевши од првог градијента већег од нуле, суседне тачке повезују све док се не успостави веза са већ постојећом тачком контуре (док контура не постане затворена, као на слици 4.15-в) (Maple С. 2003).



**Слика 4.15** Детектовање контуре гуменог профила. а) Улазна слика; б) Слика након првог корака уклањања позадине (обратити пажњу на регионе-шумове које је потребно неутралисати бројењем њихових пиксела); в) Коначни изглед филтриране слике и детектоване контуре (плава боја).

На овај начин се добија прилично прецизна детекција ивица, готово на нивоу пиксела (слика 4.16). Као што се може приметити, једна од предности предложене

методе је могућност разликовања стварне површине профила од ивице (слика 4.16-десно) - што није могуће ако се користи профил пројектор.



*Слика 4.16 Приказ детектоване контуре профила. На слици десно се види да метода разликује пикселе који се налазе на ивици профила (сива боја).*

#### 4.5.4 Рачунарски подржана контрола

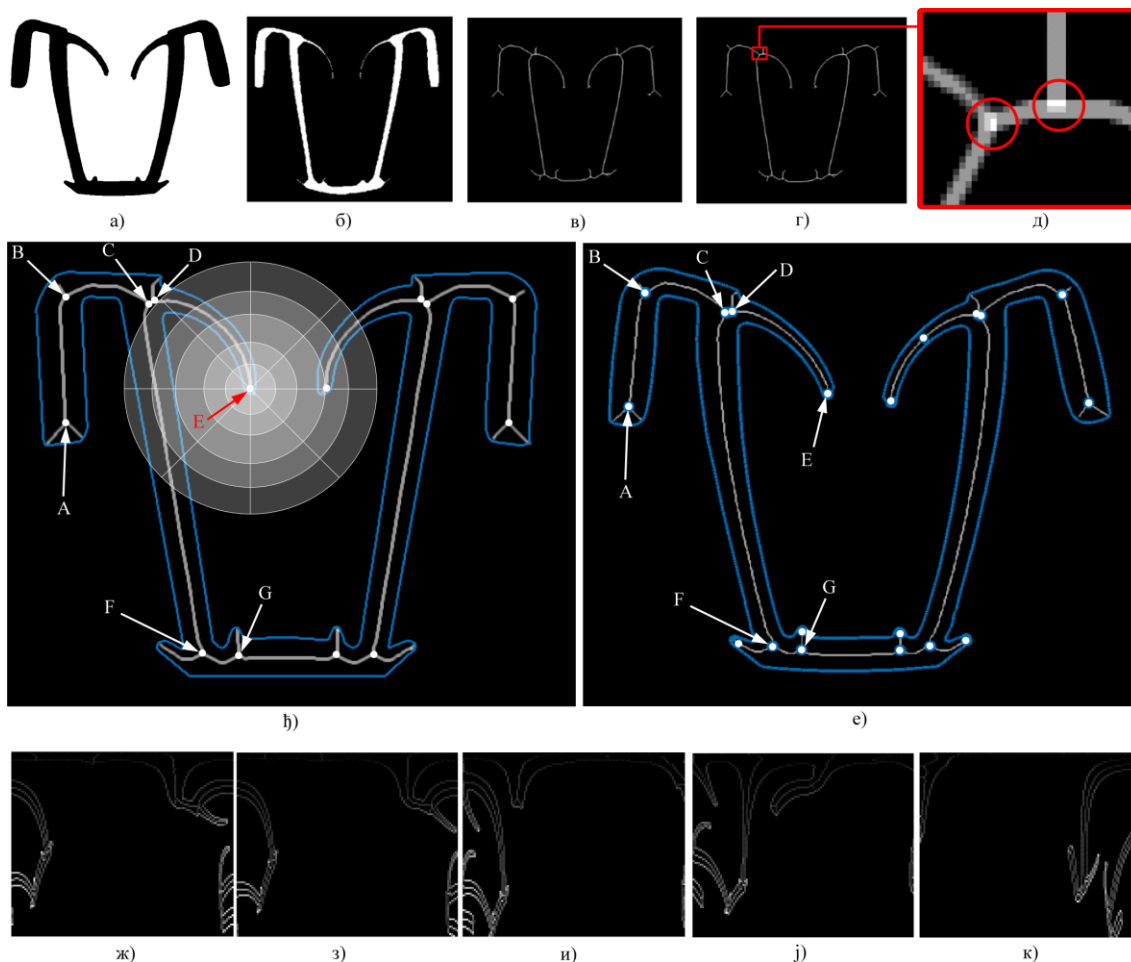
Аугментација техничког цртежа преко посматраног профила извршена је коришћењем претходно дефинисаног локалног координатног система и сегментираних контуре. Слика 4.12-ђ илустрuje изазов који је објашњен у уводном делу овог поглавља - гума је веома флексибилан материјал и из тог разлога тешко је довести гумени профил у референтни положај, чак и након постављања на носач. Као последица, неопходно је секвенцијално контролисати саставне делове гуменог профила (постоље, врат и перце) прецизним подешавањем (ротирањем и транслирањем) преклопљене контуре на областима од интереса за процес контроле квалитета. Као решење, у овом раду се предлаже поступак који аутоматски препознаје одређене регије-делове профила и затим локално преклапа (аугментује) технички цртеж на њих (слика 4.17 и слика 4.18).

#### Детекција карактеристичних (енгл. **Landmark**) тачки

Да би се аутоматизовала визуелна контрола различитих делова-регија гуменог профила, дефинисали смо низ оријентира (званих „тачке гранања“) који на интуитиван начин идентификују и декомпонују одређене делове из целог облика. Тачке гранања су изабране као поуздане јер се може очекивати њихово присуство без обзира на флексибилност делова који чине профил (постоље, врат и перце). Тачке гранања, дакле, деле профил на низ подделова - што је погодно за декомпозицију конкавних облика и чини предложени поступак генеричким и веома робустним на локалне деформације профила.

Да би се аутоматски детектовале тачке гранања, прво се креира бинарна маска из претходно откривене контуре профила (слика 4.17-а). Затим се проналазе скелетне тачке бинарне маске кроз њено итеративно еродирање (све док преостале области не буду дебљине једног пиксела, видети слику 4.17-б-в; Lam et al. 1992). Након тога је извршена конволуција скелетне слике са оператором 3x3, што

резултује са слика приказаном на слици 4.17-г. Као резултат, вредност пиксела у тачкама бифуркације биће већа од 3 (слика 4.17-д, бела боја), док ће вредности свих осталих пиксела бити у опсегу од 0 до 3 (слика 4.17-д, сива и црна боја ). У зависности од сложености облика профила, број добијених кандидата може варирати до неколико десетина, што у следећим корацима драстично смањује захтеве за рачунарским ресурсима.



**Слика 4.17** Корегистрација оријентирних-референтних тачки. а) Сегментирани профил; б) Еродирана слика сегментираног профила (после 20 итерација); в) Еродирана слика - коначна скелетонизована слика; г) Скелетонизована слика након конволуције са јединичним оператором  $3 \times 3$ ; д) Бифуркацијске тачке након савијања; е) Оријентирне тачке на референтном техничком цртежу са приказом контекста облика на тачки Е; ф) Оријентирне тачке на прегледаном профилу; ж-к) Контексти облика израчунати за различите оријентационе тачке: ж) Тачка А из референтног цртежа; з) Тачка А са прегледаног профила; и) Тачка Б са прегледаног профила; џ) тачка Ц са прегледаног профила; к) Тачка Е од прегледаног профила.

### Корегистрација референтних тачки

Референтне тачке А-Г узорковане су из техничког цртежа, као што је приказано на слици 4.17-ђ. Како би се аугментовао технички цртеж преко специфичних региона који су дефинисани приказаним референтним тачкама, потребно је идентификовати их међу одговарајућим кандидатима издвојеним у претходном кораку (видети 4.17-е). У ове сврхе развијена је нова верзија алгоритма контекста облика (који је иницијално развијен за мерење сличности геометријских облика) (Belongie S. et al. 2002). Узимајући у обзир произвољну контуру (састављену од  $n$  тачака), предложена процедура израчунава тзв. дескрипторе облика који нумерички изражавају релације између посматране тачке у односу на преосталих  $n-1$  тачака контуре. Да би се описани процес ефикасније рачунао и да би био робустнији за контуре састављене од великог броја тачака, контекст облика је израчунат као хистограм у лог-поларним координатама (слика 4.17-ђ, тачка Е). Укратко, хистограми у себи садржи информације о броју тачака пронађених у регионима дефинисаним различитим полупречницима и угловима претходно описаног локалног координатног система. Скица на слици 4.17-ђ има 8 угаоних и 5 радијалних подела, а алгоритам контекста облика заправо рачуна број тачака гранања-бифуркација и тачака централних линија унутар дефинисаних региона. Пошто је претпостављено да је поларни координатни систем смештен у тренутно посматраној тачки (тачка Е на слици 4.17-ђ), осигурали смо да је израчунати контекст облика инваријантан на транслацију, а истовремено је варијантан на скалирање. Будући да су гумени профили симетрични, употребљено је 15% најближих тачака (у односу на центар локалног лог-поларног координатног система) за рачунање контекста облика како бисмо смањили утицај целог облака тачака на локално подручје и омогућили алгоритму да лакше разликује леву од десне стране профила. Примери хистограма израчунатих за различите тачке приказани су на слици 4.17-ж-к.

Контексти облика референтних тачки узоркованих са референтног цртежа израчунати су само једном и учитани су по потреби у моментима када се користе у алгоритму. За разматрани профил (слика 4.17-ж-к, контексти облика су израчунати за све тачке-кандидате које су претходно детектоване поступком описаним у одељку „Детекција карактеристичних (енгл. Landmark) тачки“. Пошто је контекст облика прилично робустан дескриптор, проналажење кореспонденције између референтних тачки и тачки кандидата су сведене на једноставну претрагу и избор кандидата са минималном разликом хистограма. Пример корегистроване тачке А дат је на слици слици 4.17-ж (референтни технички цртеж) и слици слици 4.17-з (слика прегледаног профила).

#### 4.5.5 Аугментација техничког цртежа употребом корегистрованих референтних тачки

Као подсетник, треба нагласити да је захтев потенцијалних корисника из индустрије био да предложено решење треба да олакша, али не и да промени тренутну праксу контроле квалитета (слика 4.18). То значи да човек-оператер треба да донесе коначну одлуку, док се остатак процеса може дигитализовати. Сходно

томе, употребљена је претходно одређена кореспонденција референтних тачки да би се технички цртеж аугментовао преко предефинисаних подручја приказаних на слици 4.18-д.

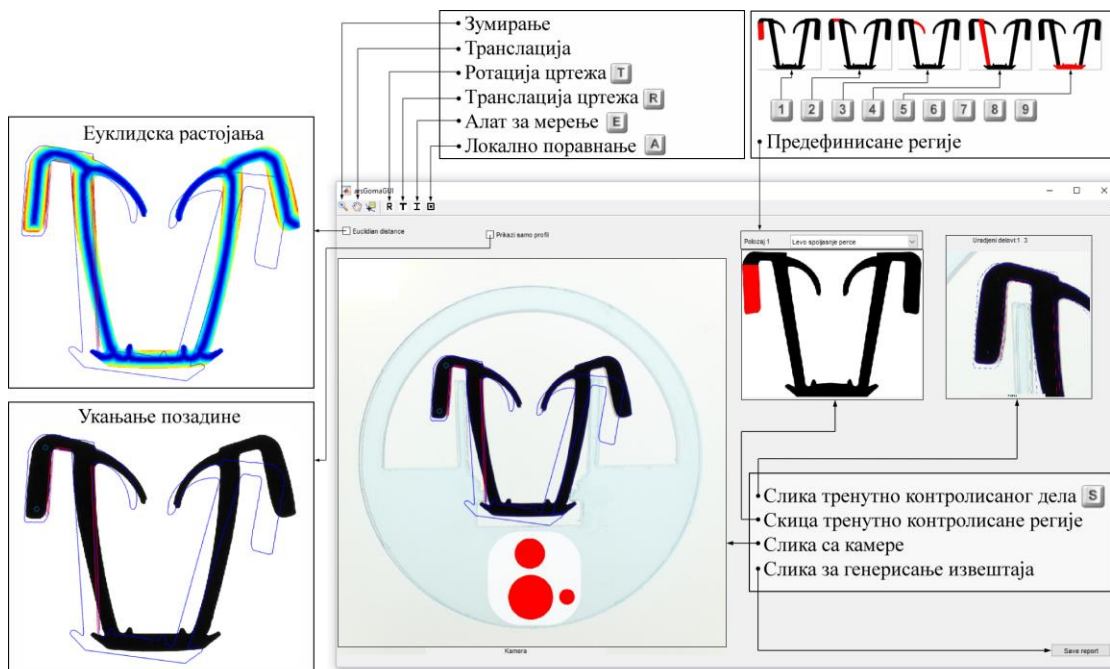


**Слика 4.18** Аугментација техничког цртежа преко корегистрованих референтних тачака. а) Почетна аугментација након калибрације система; б-г) Аугментација помоћу алгоритма итеративног налажења најближе тачке (наранџаста боја означава облак тачака изабран за аугментацију); д) Скица предефинисаних области које је потребно визуелно преконтролисати; ђ-ј) Преклапање техничког цртежа преко предефинисаних подручја (на слици се може видети како је врат савијен, што захтева додатну интеракцију корисника); з-ј) Инспекција левог врата коришћењем функције локалног поравњања.

Поравнавање је изведено коришћењем алгоритма итеративног проналажења најближих тачки, који преклапа две групе тачака (наранџаста боја на слици 4.18-б и слици 4.18-в) тако што налази оптималне парове и минимизује растојање између упарених тачки. С обзиром на облик који се разматра и величину контролисаног гуменог профила, облаци тачака су у овом раду дефинисани коришћењем 100 најближих тачака око референтних тачака (видети слике 4.18-б и 4.18-в).

Регије са Сlike 4.18-д су дефинисане од стране компаније, у којој се разматрани профил производи, као обавезне за инспекцију, тако да је циљ дигитализације био осигурати да оператер неће изоставити ниједну од њих. Да би се додатно олакшао рад оператера, омогућено је мењање-пребацавање између 9

предефинисаних приказа коришћењем падајућег менија или притиском тастера 1-9 на тастатури. Слика 4.18-г приказује аугментацију техничког цртежа преко левог перца (дефинисаног тачкама А и В). Слика 4.18-ђ приказује аугментацију техничког цртежа преко региона дефинисаног са тачкама В и С. Слика 4.18-е приказује аугментацију техничког цртежа преко левог врата (дефинисаног са тачкама С и F). Поред тога, развијена је и функционалност која омогућава кориснику да кликне на произвољну регију и изврши локално аугментовање техничког цртежа преко произвољне регије од интереса (видети илустрацију на слици 4.18-з-ј).



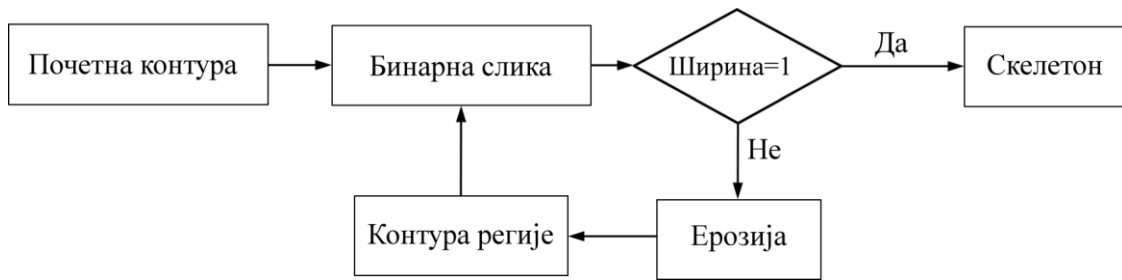
Слика 4.19 Демонстративни кориснички интерфејс са апликацијама које указују на основне функционалности развијене у овом раду.

#### 4.5.6 Функционалности за додатно олакшање рада корисника и опис развијеног корисничког интерфејса

За мерење дебљине профила, од интереса су превасходно врат и перо профила. У овом раду је развијена метода која аутоматски рачуна и приказује дебљину профила у милиметрима. Процедура се састоји од следећих корака:

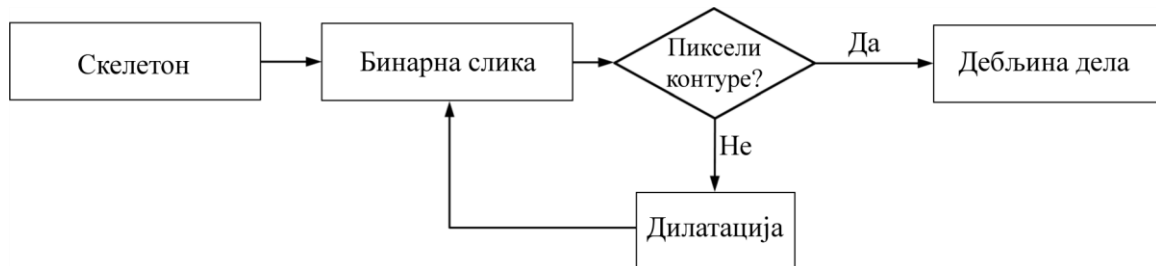
1. Искористити детектовану контуру профила за генерисање бинарне маске.
2. Пронаћи централне линије-скелетоне бинарне маске профила користећи алгоритам приказан на слици 4.20 (резултати су приказани на слици 4.22) (Lam et al. 1992). Процедура свој рад почиње од ивица креиране бинарне маске – тако што врши итеративну ерозију бинарне маске, која се врши све док преостале области маске не буду дебљине једног пиксела.





Слика 4.20 Процедура за рачунање тачки скелетона бинарне маске.

3. Полазећи од тачки-пиксела детектованог скелета маске, врши се пропација назад до контуре профила (слика слици 4.21), где се за сваки од корака ширења тренутним пикселима преко којих се та пропација врши повећава бројач (који указује на дебљину профила). Овај процес је потребно понављати све док се не стигне до ивица контуре од које је првобитно направљена бинарна маска. На крају, вредности сваког пиксела множе се фактором скалирања који је одређен у кораку калибрације (слика 4.23).



Слика 4.21 Алгоритам за рачунање дебљине профила.

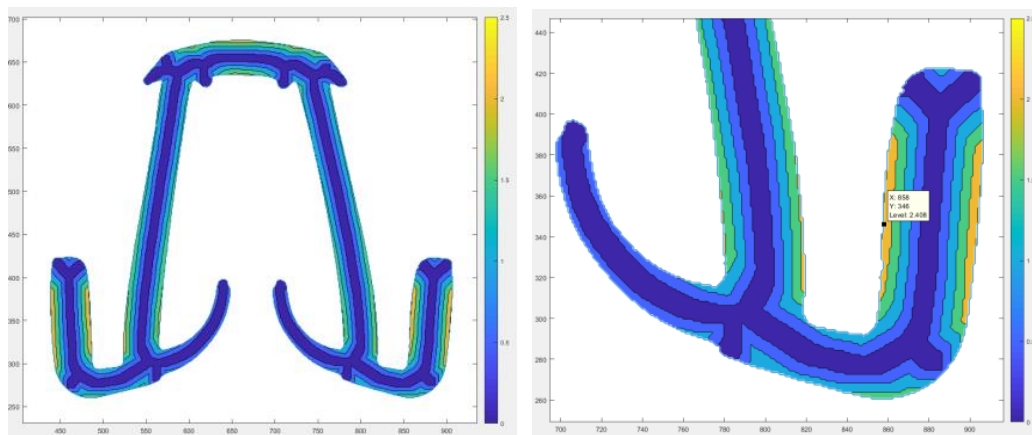


Слика 4.22 Почетна бинарна маска, међурезултати ерозије и финални резултати одређивња скелетона бинарне маске.

1140x1279 single

		628	629	630	631	632	633	634
633	7	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
634	7	8	9	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
635	8	8	9	10	11	12	13	14
636	8	9	9	10	11	12	13	13
637	9	9	10	10	11	12	12	12
638	9	10	10	10	11	11	11	12
639	9	9	9	10	10	10	11	11
640	8	8	9	9	9	10	10	11
641	7	8	8	8	9	9	10	10
642	7	7	7	8	8	9	9	10
643	6	6	7	7	8	8	9	9
644	5	6	6	7	7	8	8	8
645	5	5	6	6	7	7	7	8
646	4	5	5	6	6	6	7	7
647	4	4	5	5	5	6	6	6
648	3	4	4	4	5	5	5	5
649	3	3	3	4	4	4	4	5
650	2	2	3	3	3	3	4	4
651	1	2	2	2	2	3	3	3
652	1	1	1	1	2	2	2	2
653	0	0	0	1	1	1	1	1
654	1	1	1	0	0	0	0	0

а)



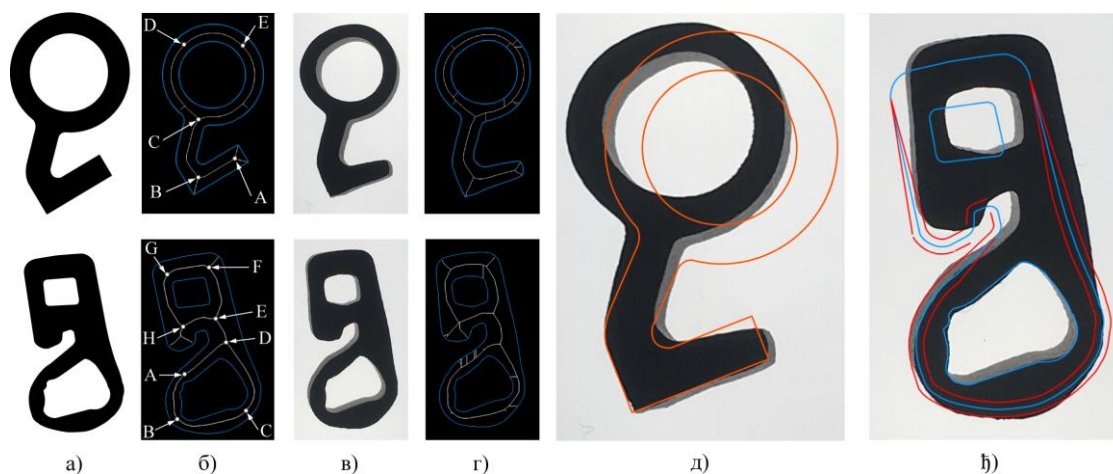
б)

в)

**Слика 4.23** Одређивање дебљине профила. а) Матрица са вредностима пиксела при пропацији од централне линије ка ивицама профила; б) Поглед на цео профил; в) Поглед на специфични део (перце) профила.

Након аугментације, оператеру је омогућено да фино позиционира и прилагоди референтни цртеж преко прегледаног профила (са минималним зумирањем, транслирањем и ротацијом). На овај начин могу се прилично прецизно прегледати различити региони од интереса. Поред поменутих функционалности, представљено решење има и низ функционалности попут аутоматског уклањања позадине, алата за мерење и аотирање - који су посебно корисни за припрему извештаја о контроли квалитета. Након обављене инспекције, слике извршених инспекција се аутоматски архивирају у циљу олакшавања генерисања документације о извршеној контроли квалитета.





**Слика 4.24** Прилагођавање предложеног поступка за инспекцију произвољног профила. (а) Референтни облици профила дефинисани техничким цртежима; (б) Контуре и референтне тачке извађене из техничких цртежа; (в) Сlike контролисаних профила направљене опремом описаном у одељку 4.5.1; (г) Контуре и кандидати за референтне тачке извађене из детектованих централних линија профила; (д-ђ) Преклапање референтних техничких цртежа на регионима дефинисаним са тачкама А и В са слике 4.24-б.

#### 4.5.7 Адаптација изложене процедуре за контролу профила произвољног облика

Ради јасноће и конзистентности, предложени поступак је објашњен узимајући у обзир један репрезентативан облик профила (слика 4.12). Пошто компаније обично имају више различитих облика профила у свом асортиману, у овом одељку је објашњено како да се предложени поступак прилагоди и употреби за инспекцију профила произвољних облика (случај употребе приказан је на слици 4.24). Конкретно, два потребна корака су: 1) израда прозирног носача профила од плексигласа (профили са унутрашњим шупљинама попут профила приказаног на слици 4.24 углавном не захтевају носаче) и 2) екстракција референтне контуре из техничког CAD цртежа профила. Што се тиче другог корака, подразумева се екстракција како контура, тако и толеранција и оријентационих-референтних тачака из CAD цртежа. У ове сврхе коришћен је једноставан кориснички интерфејс који нам омогућава да ручно извадимо – т.ј. поново нацртамо контуре и толеранције, док су референтне тачке екстраковане по процедури описаној у претходним одељцима. Коначно, како бисмо унапред предефинисали области за аутоматизовану аугментацију техничких цртежа (одељак 4.5.4), корисник мора дефинисати само парове извађених референтних тачака које дефинишу карактеристичне регионе. слика 4.24-д-ђ приказује аугментацију региона дефинисаних са тачкама А и В на слици 4.24-б).

### 4.6. Добијени резултати

Табела 4.1 Перформансе<sup>38</sup> мануелне и предложене (полуаутоматске) димензионе конотроле гумених профила.

Укупно mean ± std (min – max)	Искуство оператора [месеци]		Ручна контрола	Предложена полуаутоматска контрола
	1	12		
0.81 ± 0.03 (0.78–0.84)	0.79	0.84	Accuracy [%]	Accuracy [%]
0.80 ± 0.03 (0.76–0.84)	0.80	0.82	PPV	PPV
0.83 ± 0.03 (0.79–0.86)	0.83	0.85	NPV	NPV
0.81 ± 0.03 (0.78–0.84)	0.79	0.84	AUC	AUC
0.84 ± 0.03 (0.8–0.88)	0.82	0.86	Sensitivity (сензитивност)	Sensitivity
0.79 ± 0.03 (0.76–0.84)	0.76	0.82	Specificity (специфичност)	Specificity
0.63 ± 0.06 (0.58–0.68)	0.58	0.68	κ	κ
0.69 ± 0.09 (0.63–0.76)	0.63	0.76	κ-Intra-observer	κ-Intra-observer
0.67	/	/	κ-Inter-observer	κ-Inter-observer
0.875 ± 0.03 (0.84–0.9)	0.85	0.9	Accuracy [%]	Accuracy [%]
0.87 ± 0.04 (0.84–0.91)	0.87	0.91	PPV	PPV
0.87 ± 0.02 (0.84–0.88)	0.85	0.88	NPV	NPV
0.875 ± 0.03 (0.84–0.9)	0.85	0.9	AUC	AUC
0.87 ± 0.02 (0.84–0.88)	0.86	0.88	Sensitivity	Sensitivity
0.88 ± 0.04 (0.84–0.92)	0.84	0.92	Specificity	Specificity
0.76 ± 0.06 (0.72–0.8)	0.72	0.8	κ	κ
0.77 ± 0.02 (0.75–0.79)	0.75	0.79	κ-Intra-observer	κ-Intra-observer
0.73	/	/	κ-Inter-observer	κ-Inter-observer

<sup>38</sup> Accuracy (тачност), Енгл. PPV – positive predictive value (позитивна предиктивна вредност), NPV – negative predictive value (негативна предиктивна вредност), AUC – area under characteristic curve (површина испод ROC криве), κ - карра вредност.

Резултати приказани у овом поглављу добијени су коришћењем опреме приказане на слици 4.12. Имплементација је извршена коришћењем Matlab 2017b (Mathworks, Natick, MA) окружења. У овој студији случаја задатак димензионе инспекције посматран је као проблем бинарне класификације. Да би се провериле и квантификовале перформансе развијене процедуре, резултати полу-аутоматске димензионе контроле су упоређени са резултатима ручног прегледа извршеног на профил пројектору приказаном на слици 4.12. За ове сврхе изабрано је 25 дефектних гумених профила из базе-архиве компаније (која одговара количини дефеката који се могу јавити у периоду од 20 до 40 радних дана).

Да би скуп података био уравнотежен (балансиран), укључили смо и 25 исправно израђених профила. У анализу су била укључена два оператера са различитим нивоом искуства (1 и 12 месеци). Од сваког оператера се тражило да ручно и полу-аутоматски прегледа 50 издвојених профила. Инспекције су поновљене два пута како би се утврдила варијабилност (утицај људског фактора на променљивост и поновљивост перформанси). Тачне (engl. Ground truth) вредности одређене су претходно концензусом експерата компаније који се баве контролом квалитета.

Перформансе оператора изражене су мерењем: тачности енгл. Accuracy =  $(TP + TN) / (T + P)$  - однос исправно класификованог и укупног броја узорака, позитивна предиктивна вредност енгл. (Positive Predictive Value)  $TPV = TP / (TP + FP)$  - вероватноћа да су исправни узорци класификовани као дефектни и лажно негативне стопе енгл. (Negative Predictive Value)  $NPV = TN / (TP + FP)$  - вероватноћа да су дефектни узорци правилно класификовани; где TP (енгл. True positive) и (енгл. True negative) TN представљају број узорака без и са дефектима који су исправно препознати; FP (енгл. False positive) и (енгл. False negative) FN представља број профила који су погрешно класификовани као исправни односно неисправни; и T и P су укупни број исправних и дефектних профила. Ове метрике су даље коришћене и за израчунавање осетљивости (енгл. Sensitivity), специфичности (енгл. Specificity) и површине испод ROC (енгл. Receiver Operating Characteristics) криве (енгл. AUC – Area Under Curve). Што се тиче процене осетљивости развијене методе на људске факторе (поновљивост), интра и интер-обсервер варијабилност су одређени рачунањем капа-к статистике (Donner A. et al. 1996).

#### 4.7. Дискусија четвртог поглавља

Како је гума веома флексибилан материјал, димензиона контрола екструдованих гумених профила и даље представља проблем у аутомобилској индустрији. Иако се инспекција своди на поређење контролисаног дела са одговарајућим референтним техничким цртежом, поузданост субјективних одлука посматрача остаје главни недостатак тренутне праксе. Резултати из Табеле 4.1 показују да искуство оператера веома утиче на перформансе мануелне контроле. Сви показатељи говоре да је искусни оператер (особа са 12 месеци искуства у обављању овог задатка може се сматрати искусном) у значајној мери прецизнији од оператера-почетника. Генерално, постизање што веће поузданости сматра се једним од најважнијих циљева за компаније које теже ка смањењу дефеката и шкарта у аутомобилској индустрији; Посебно зато што су делови-производи обично направљени у великим серијама - одбијање испоруке (због дефеката) узрокује озбиљне губитке за компаније.

Узимајући у обзир наведене чињенице, резултати из Табеле 4.1 показују двоструки допринос предложеног полуаутоматског поступка. Прво, у поређењу са ручним димензионим прегледом, повећане су перформансе почетника и искусних оператера

(тачност, PPV, NPV, AUC, вредности осетљивости и специфичности у Табели 4.6.1). Затим, што је још важније, повећана је интра / интер-обсервер поузданост димензионалне инспекције (вредности капа у табели 4.6.1). Процена је показала да предложени поступак омогућава оператерима-почетницима (тачност = 0,85) да достигну перформансе искусних оператера који су такође вршили преглед димензија (тачност = 0,84). Корисност овог побољшања је важна, с обзиром на то да повећава робустност компанија на флукуацију кадрова, што се сматра главном бригом у данашњој конкурентски настројеној индустрији. Штавише, добијене вредности капа статистике показале су да је предложени поступак добар и у смислу поновљивости. Конкретно, вредност интра-обсервер поузданости ( $\kappa = 0,77 \pm 0,02$ ) била је на ивици са поклапањем оператора са референтним-тачним оценама ( $\kappa = 0,76 \pm 0,06$ ), док је сличност између посматрача између искусног и почетника показао значајан споразум ( $\kappa = 0,73$ ). Узимајући у обзир представљене налазе, може се закључити да је укупно побољшање перформанси оператера износило ~ 6%.

#### 4.7.1 Допринос у односу на претходне студије

Током последње деценије, много напора је уложено у унапређење контроле квалитета и димензионе инспекције базиране на примени техника машинске визије. Иако се низ комерцијалних решења издвојио као индустријски стандард за опште намене, пракса је показала да још увек постоји велики број специфичних проблема у индустрији који захтевају *наменска* решења. Димензионална контрола екструдованих гумених профила представља такав проблем, чији су изазови објашњени и разматрани у овој студији. У поређењу са претходним студијама, предложени приступ има низ разлика које се могу истаћи као научни допринос.

Први је чињеница да ова студија полази од конкретних и прецизно дефинисаних потреба из привреде, што је резултирало употребљивошћу предложеног решења. На пример, ниједна од претходних студија није користила носач профила и последично није предвидела довођење профила у референтни радни положај. Уместо тога, претходне студије су претпоставиле да инспекцију треба обавити у слободном положају. Према искуству стеченом током ове студије, такав вид контроле представља одступање од праксе дефинисане индустријским прописима и уговорима између произвођача и купаца. Пратећи листу захтева, предложено је решење које аутоматизује све задатке контроле квалитета изузев доношења дефинитивног закључка о инспекцији профила - који треба да обавља човек.

Друго, у поређењу са претходним студијама, изложена студија је избегла употребу више камера и сложених техника за тродимензионалну реконструкцију. Уместо тога, ова студија је извршена са циљем да подржи тренутну праксу, која подразумева контролу профила у 2D простору. Овакав приступ је у великој мери поједноставио проблем и повећао је поузданост решења, јер методе за 3D реконструкцију из вишеструких пројекција захтевају скупу опрему да би се постигла тачност у оквиру толеранција дефинисаних техничким цртежима.

Трећа предност ове студије је њена прилагодљивост, што је објашњено у одељку 4.5.7. Предложени поступак заснован је на детекцији контуре и њеној анализи облика, као и на корегистрацији и поравнању референтних тачки. Комбиновањем ових техника предложени поступак би се могао прилагодити за инспекцију гумених профила различитих облика (што је важно јер компаније производе широк спектар профила).

И на крају, један од најважнијих захтева индустријске праксе био је приступачност решења. Поред прилагодљивости, трошкови су једна од најважнијих препрека за

примену комерцијалних решења опште намене. Ови трошкови могу бити повезани са: скупим камерама, временом потребним за прикупљање довољне количине поменутих података у сврху учења алгоритама вештачке интелигенције, графичких процесора који су потребни за ефикасно покретање алгоритама вештачке интелигенције, стручности потребне за касније прилагођавање почетног решења за наручени гумени профил, итд. С обзиром на то, предложено решење избегава ове препреке и представља пример такозване „јефтине аутоматизације“.

#### **4.8. Могућности потпуне аутоматизације**

Инспекција заснована на алгоритмима вештачке интелигенције представља атрактивну тему у научној заједници. Користећи предложени поступак, могуће је развити систем заснован на примени AI – који би користио аутоматски детектоване атрибуте и карактеристичне тачке у сврху учења и накнадне експлоатације тренираних AI алгоритама. У нашем случају, од интереса могу бити атрибути као што су дужина и дебљина саставних делова профила. Дебљине и дужине базе, врата и пера могу се аутоматски проценити коришћењем претходно описаних референтних тачки. Што се тиче дебљине, на располагању је функција која аутоматски израчунава дебљине користећи претходно сегментирану бинарну маску и контуру профила. Полазећи од костурних пиксела, регија се шири према контури профила уз узимање у обзир броја пиксела и уписујући их у матрицу дебљине. Коначно, боја дебљине приказана на слици 4.22 (еуклидске удаљености) добијена је множењем матрице дебљине са величином пиксела која је одређена током корака калибрације.

Разлози због којих се у овом раду одустало од даље аутоматизације система су двоструки. Прво, иако се потпуна замена људских оператера чини атрактивним у литератури, пракса на пољу контроле квалитета екструдираних гумених профила показала је да примена таквих решења у стварним условима занемарљива и непрактична. Друго, треба нагласити да је један од захтева из привреде био да се предложи решење које је лако за коришћење, али које не мења тренутну праксу компаније (што значи препуштање људском оператеру да донесе коначну одлуку). Да сумирамо, у тренутној фази транзиције ка парадигми Квалитет 4.0 компаније су више заинтересоване за алате који могу да повећају поузданост и перформансе људских оператера - уместо да их потпуно замене рачунаром. Сходно томе, одлучено је да студија остане компактна и релевантна како за индустрију, тако и за научну заједницу заинтересовану за даљу аутоматизацију предложеног поступка.

##### **4.8.1 Смернице за будући рад**

Познато је да понављајући послови узрокују умор и смањење концентрације и когнитивних способности радника, што треба спречити да би се постигли жељени резултати у контроли квалитета. Предложени поступак смањује зависност од људских експерата и напор који је потребан да се изврши при инспекцији димензија гумених профила. Дигитализацијом пратећих извештаја лакше је открити и спречити недостатке у контроли квалитета. Снимљене слике инспекције могу пружити менаџменту увид у искуство оператера, што компанији даље омогућава додатну обуку за запослене са слабијим перформансама. Континуирано усавршавање и генерално усавршавање запослених важан је аспект у данашњој индустрији која се брзо развија и мења. Сходно томе, дигитализовани системи могу да подрже и обуку и обезбеде да запослени достигну жељену изврсност у контроли екструдованих гумених профила. Генерално,

добијена повратна информација од укључених оператера била је да, у овом тренутку, дигитализација доноси већу практичну вредност.

#### **4.9. Закључак четвртог поглавља**

Разматрани проблем димензионалне контроле екструдованих гумених профила у аутомобилској индустрији је комплексан проблем, јер је гума веома флексибилан материјал, што ручни преглед чини тешким и дуготрајним. Иако су неке студије имале за циљ аутоматизацију овог задатка, њихова шира примена у индустријској пракси и даље је ограничена због флексибилности гуме и варијабилности облика које компаније производе. Полазећи од листе захтева из индустријске праксе, ова студија је предложила ново полуаутоматско решење засновано на употреби приступачне опреме и посебно развијених алгоритама. Добијени резултати показали су низ предности које доноси предложено дигитализовано решење. Прво, експериментално је показано да се може повећати поузданост оператера, истовремено смањујући време потребно за обављање инспекције. Поред тога, приказан је низ пропратних функционалности и бенефита, са закључком да предложено решење олакшава управљање извештајима контроле квалитета, праћење и откривање скривених образаца појаве недостатака како у производњи тако и у контроли. Ове предности се могу користити за пружање сталног усавршавања запослених и усавршавања њихових вештина, што је важно за обезбеђивање конкурентности МСП на глобалном тржишту.

## 5. Управљање палетама применом машинске визије, QR кодова и веб камера

Свака производно-оријентисана компанија (било да су то мала или средња предузећа, или велике мултинационалне компаније) се свакодневно сусрећу са проблемом управљања огромним бројем различитих сировина и компоненти. Поменуте сировине (или полу-производи) се по правилу користе за даљу производњу већег броја различитих финалних производа које требају на време да се испоруче купцима-клијентима. Успех било које компаније зависи од несметаног и континуалног протока материјала у ланцу снабдевања. У свакој производној компанији нежељени ниво залиха (сиrovина, недовршен производ или готови производи који немају купца) идентификује се као заробљени капитал. Због тога, свака компанија покушава да минимизира ниво залиха, али и да осигура брз и непрекидан, континуирани проток материјала и спречи било какве прекиде у производњи због закаснеле испоруке материјала.

У овом раду, штампарска индустрија је разматрана као репрезентативан пример јер у процесу производње постоји дословно стотине различитих варијација папира (врсте, тежине, боја, порекло, оријентација влакана, површина, карактеристике штампања итд.) и пратећих материјала који се свакодневно користе. Даље, кроз процес производње, процеси (и ресурси) којима је потребно управљати су још сложенији јер је сваки производ (књига, брошура, каталог) различит и јединствен по бројним карактеристикама. Да би се тако сложеним процесом производње управљало, подразумева се да је на првом месту управљање материјалима (од складиштења сировина, преко свих производних процеса, до складиштења коначног производа) оптимално. У пракси, то је врло сложен задатак који је повезан са бројним препрекама и уопштено је идентификован као један од главних извора отпада, губитака, кашњења и прекомерне употребе ресурса у индустрији. При томе, МСП су посебно угрожена јер нису у стању да примене софистицирана и скупа решења за управљање материјалима (као што то могу велике компаније).

### 5.1. Концепт предложеног решења

У овом поглављу, постављени циљ је развити интуитиван систем за управљање материјалима који се заснива на концептима Индустрије 4.0 (машинске визије и рачунарства у облаку). Концепт предложеног решења је приказан на слици 5.1. Конкретно, потребно је истражити потенцијал примене и развити функционално решење базирано на употреби техника машинске визије, које ће служити као подршка запосленима. Основне функционалности које такав систем треба да пружи јесу интуитиван рачунарски управљачки систем за прикупљање, обраду и визуелизацију положаја материјала (смештеним на палетама<sup>39</sup>) у фабричком простору. Предложено решење је имплементирано и тестирано у реалним условима у компанији у Крагујевцу. Укратко, концепт решења подразумева да су камере фиксне и позициониране тако да омогућавају надгледање одабраних локација складишта у производњи (у питању су локације где се материјали складиште између различитих фаза производње). Камере и софтвер треба да препознају палете/кутије са штампаним материјалом на основу 2D-QR кода који се налази на њиховом врху.

<sup>39</sup> <https://www.1001pallets.com/standard-pallet-sizes-and-dimensions>



**Слика 5.1** Концепт и елементи дигиталног складишта палета.

Камере континуирано шаљу информације серверу где се слике обрађују и анализирају. Информације о напретку производње и протоку компонената/сировина производа одмах су доступне руководиоцу производње за потребе планирања и контроле, као и тим-лидерима кроз једноставан визуелни систем на великом екрану.

Системи управљања материјалима, независно или као део енгл. ERP система (енг. Enterprise Resources Planning), представљају један од перспективних праваца за развој подржаних хардверских/софтверских платформи последњих година. Иако су доступна ERP софтверска решења бројна и разноврсна (од сложених до једноставних), још увек постоји значајан недостатак ERP модула или независних система који би могли да омогуће праћење протока материјала у реалном времену на нивоу предузећа (складишта, надгледање складишта, праћење инвентара). Из тог разлога, потреба за истраживањима и практичном раду на реализацији изложеног проблема јесте оправдана и може довести до резултата који представљају напредак како за индустријску тако и за научну заједницу.

## 5.2. Управљање палетама – тренутна пракса и недостаци

Постојећи систем управљања материјалима у датом предузећу заснован је на стандардним принципима управљања и радним налозима. Зоне одлагања и складиштења материјала контролишу радници којима су додељени ти радни задаци, а простор се користи у складу са актуелним потребама и постојећим захтевима дефинисаним радним задацима и захтевима купаца. Тренутно, због динамике посла (и промена које прате раст посла и фирме), не постоји ни систем ни метода за контролу вишег нивоа, размена информација, прикупљање података и прецизно дефинисан систем одлучивања и управљања на основу података. То доводи до честих проблема, у виду кашњења и застоја. Производња која је актуелна често повећава ниво акумулираних међу-ресурса/производа, што даље резултира значајном пренатрпаномшћу простора и екстремним губитком времена за тражење недостајућих палета и делова материјала потребних за даљу производњу. Иако је простор графички обојен, то ретко олакшава рад запосленима због раније објашњених проблема везаних за управљање током материјала у датој фабрици.





*Слика 5.2 Изглед материјала на палетама у разматраном радном простору.*

### 5.2.1 Дефиниција захтева

Са становишта менаџмента, недостаци тренутне праксе су следеће чињенице:

- Због велике фреквенције и преоптерећења, возачи виљушкар се неретко не придржавају енгл. FIFO правила - што резултира погрешно распоређеним палетама.
- Неправилно распоређене палете повећавају време потребно за проналажење и попис палета које су доступне у складишту. Посебно је важно омогућити да се изврши брза идентификација комплетних радних налога и локација њихових палета.
- Немогућност прецизног и ефикасног пописа свих расположивих палета у складишту узрокује кашњења у наредним производним операцијама. Надлежни у предузећу су посебно нагласили да би та одлагања могла бити и до три сата - што узрокује значајне губитке.

### 5.3. Преглед комерцијалних решења доступних на тржишту

Енгл. Cognex<sup>40</sup> је светски лидер у развоју система за читавање баркодова помоћу камера и скенера. Наиме, Cognex је развио апликацију за аутоматско читање баркодова на палетама – које заједно са функционалностима које пружа DataMan®<sup>41</sup> нуди решења за читање кодова са удаљених локација. Фиксирани Cognex DataMan читачи су погодни за два најчешћа случаја употребе:

<sup>40</sup> <https://www.cognex.com/applications/customer-stories/logistics>

<sup>41</sup> <https://www.cognex.com/applications/customer-stories/logistics?page=1&productType=dataman>

- Cognex читачи баркодова су фиксирани на локацију где би палете требало да буду складиштене (слика 5.3 лево). Ово решење има могућност истовременог читања више кодова, при чему се користи више камера (читача) тако да могу са великом поузданошћу покрити комплетну површну палете. То је могуће захваљујући робустности DataMan алгоритама који могу прочитати кодове без обзира на варијације у спољашњем осветљењу, фолијама које су често прелепљене преко кодова, делимично оштећеним кодовима итд.
- Cognex читачи баркодова су фиксирани на виљушкарима (слика 5.3 десно). Монтирањем Cognex читача на виљушкаре омогућава се читање кодова који могу бити везани за комплетну палету – или појединачне пакете које она носи. Компанија свој производ DataMan 300 описује као мали, компактни уређај високе резолуције који је робустан на варијације (осветљење) околине, те да је у стању покрити 360 степени око простора предвиђеног за палету.

Функционалности које Cognex решења пружају као одговор на захтеве тржишта:

- Читање свих кодова (видљивих на сцени/екрану) „из првог покушаја“, укључујући и оне који су оштећени, савијени или затамњени из неког разлога током транспорта на палетама.
- Идентификацију кодова, без обзира на њихов број и оријентацију на палетама.
- Велика радна резолуција и видно поље, како би се обухватила комплетна ширина и висина палете.
- Гарантована робуност решења која се монтирају на виљушкарима, а која раде са великом поузданошћу како на унутрашњим тако и на спољашњим просторима.
- Ефикасно читавање на свим врстама површина (налепнице, картон, пластика, стакло итд.).



Cognex image-based readers can decode multiple codes over the width and height of the pallet, in any orientation.



Cognex DataMan reads codes through plastic film, even if they are damaged.

**Слика 5.3** Изглед Cognex решења. а) Cognex DataMan читача који су фиксирани на локацији складиштења палета. б) Изглед читача постављеног на виљушкар. Слика је преузета са официјалног сајта компаније Cognex.

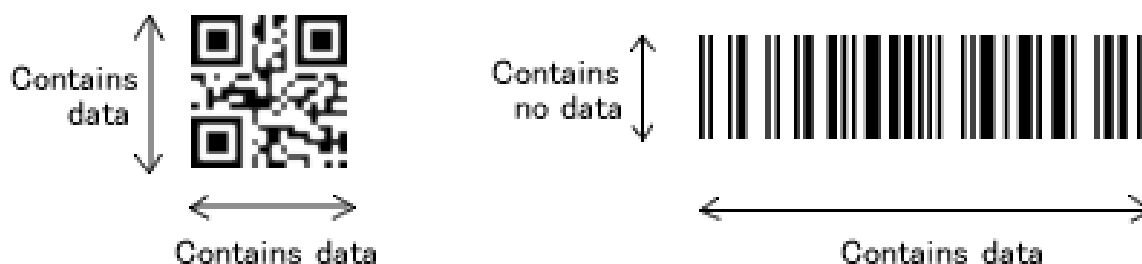
### 5.3.1 Преглед примена QR кода у логистици и генерално у производној индустрији

Тренутно, примарна намена QR кодова јесте у промотивне сврхе, праћење производа, тикетирање и генерално маркетинг (Focardi R. et al. 2019). Најзаступљенији

пример употребе јесте отварање веб страница помоћу претраживача на мобилним телефонима. У последње време, покренута је дискусија на тему безбедности и могућих злоупотреба QR кодова. Конкретно, Kaspersky Lab је први забележио злонамерну употребу – где су корисници усмеравани на страницу са „малвером“, који су затим несвесно скидали и инсталирали на своје уређаје (Kaspersky Lab 2011). Qian et al. су истражили могућности праћења дводимензионалних кодова у прехранбеној индустрији, и упоредили их са RFID технологијом (Qian J.-P. (2012)). Евалуација предложеног система је показала да имплементација поменутих технологија подиже укупне трошкове на 17.2%, али такође и подиже ефикасност и продају на 32.5%. Liang et al. су предложили употребу QR кода за праћење и сепарацију опреме (Liang P. 2019). У раду из 2020. године, Lie et al. су предложили систем, базиран на интернет стварима (енгл. IoT), који омогућава читање баркодова за различите потребе паметних градова (Liu et al. 2020). У многим фирмама, користе се за аутентификацију запослених. Генерално, до сада, показало се да QR кодови нису поуздани у случајевима где се захтева веома кратко време читања и где су објекти који носе код у покрету. Такође, да би се QR код прочитао подразумева се да је слика довољно јасна и у одговарајућој резолуцији – што је до скора представљало препреку јер су IP камере углавном имале малу резолуцију.

### 5.3.2 Принцип рада и врсте баркодва и QR-кодова

QR код (енгл. Quick Response code) је развила компанија енгл. Denso Wave 1994. године, за потребе ауто индустрије у Јапану. Конкретно, иницијални проблем који је требало решити јесте брзо праћење аутомобила и аутомобилских делова у процесу производње. Од тада, широко је прихваћен у бројним и разноликим индустријама, укључујући: производњу, логистику и управљање складиштима, здравство, транспорт, продају (супермаркети), маркетинг итд. Последњих година, са развојем мобилних уређаја и њихових камера, прва асоцијација на QR код јесте маркетинг. Спецификација и патентна документација о начину и алгоритмима по којим функционишу читачи и писачи QR кодова садржи на десетине и стотине страница. За успешну индустријску примену QR технологије неопходно је само познавање кључних принципа и врста QR кодова – како би се осигурало да је развијена технологија одговарајућа-робустна на предвиђене услове у индустрији и компатибилна са индустријским стандардима<sup>42</sup> везаним за QR технологију.







Слика 5.4 Енгл. Universal Product Code (UPC) је најчешће коришћени пример 1D кода у радњама и маркетинга<sup>43</sup>.

<sup>42</sup> <https://www.iso.org/standard/62021.html> - Стандард из 2015 године (ISO/IEC 18004:2015).

<sup>43</sup> Информације о производу су садржане у паралелним линијама-баровима, које се разликују по хоризонталним димензијама – ширини и размацама и положају с лева на десно; док висина барова не игра улогу у чувању информација (слике су преузете из документације компаније Denso Wave).

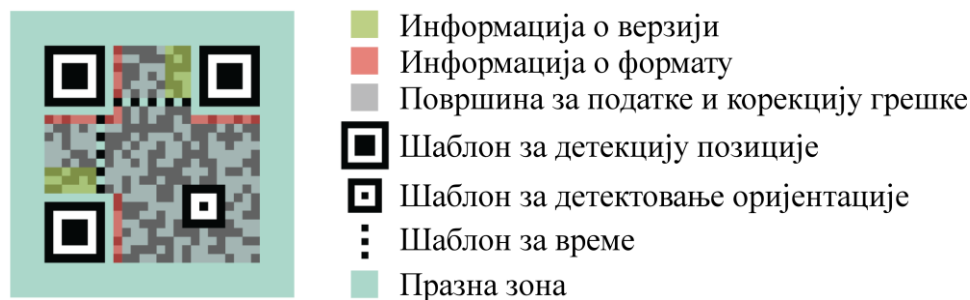
**Табела 5.1** Приказ различитих дводимензионалних кодова који су у употреби у пракси (подаци су преузети из документације компаније Denso Wave).

		QR код	PDF417	DataMatrix	MaxiCode
					
Развијен од стране		Denso Wave	Symbol technologies	RVSI Acuity CiMatrix	UPS
Капацитет (макс. број карактера)	Бројеви	7089	2710	3116	138
	Слова	4296	1850	2355	93
	Бинарни	2953	1018	1556	-
Примена		Све категорије	Канцеларије	Аутоматизација фабрика	Логистика
Стандарди		AIM, JIS, ISO	AIM, ISO	AIM, ISO	AIM, ISO

У индустрији, QR код припада групи дводимензионалних матричних кодова – који припадају широј групи машински-читљивих кодова. У ширем смислу речи, машински читљиви кодови се сматрају баркодовима, без обзира на то да ли су реализовани на принципу барова, коцки, кругова или неких других геометријских облика. Широј јавности је свакако најпознатији пример баркод, који се користи при куповини, тј. за идентификацију производа (он припада групи једнодимензионалних кодова). У поређењу са једнодимензионалним кодовима, дводимензионални кодови имају могућност записа више података на мањем простору. QR кодови представљају напредну верзију, и у поређењу са другим 2D кодовима имају већи капацитет чувања информација, имају напредне методе за корекцију грешака (које настају услед оштећења, гужвања и сл.) и низ других карактеристика које су издвојиле QR код као најпозданији у пракси. Иако визуелно није читљив човеку, QR код има своја правила – по којима се језик лако читљив човеку конвертује у слику која је лако читљива рачунарима.

Саставни делови једног QR кода су приказани на слици 5.4. Као што се може приметити, постоји низ карактеристичних-саставних делова који поред података садрже и информације о позицији и оријентацији кода у простору. Сивом бојом је обележена чиста (енгл. Quiet) зона без података око кода – величине четири модула, чији је циљ да осигура да околина (на пример околни текст на папиру) неће негативно утицати на процес детекције. У ћошковима (доле лево, горе лево и десно) налазе се елементи за детекцију QR кода. Њихова специфична позиција и размера линија који их чине (1:1:3:1:1) су значајно убрзали рад скенера и њихову могућност препознавања оријентације кодова на слици (око двадесет пута брже од претходно коришћених матричних кодова). Различитим бојама на слици 5.4 приказане су специфичне зоне које садрже информације о верзији, формату и подацима које QR код носи. Постоји око четрдесет верзија QR кода, најчешће су у употреби верзије 1 и 2, које имају 21x21 и 25x25 модула, респективно – количина информација која се може записати у датом верзији зависи од броја-димензије модула (више модула значи већи капацитет). У зони

у којој су садржани подаци налазе се елементи неопходни за тзв. енгл. Reed-Solomon код, опште прихваћена метода за корекцију грешака на штампаним кодовима. На тај начин омогућено је читање QR кода чак иако је његов добар део оштећен. Постоје четири врсте-нивоа корекције QR кода који могу опоравити-кориговати различите нивое грешки: L (7%), M (15%), Q (25%) и H (30%). При томе, треба узети у обзир да су нивои корекције грешке повезани са величином QR кода (већи степен корекције тражи веће димензије кода).



Слика 5.5 Принцип рада QR кода.

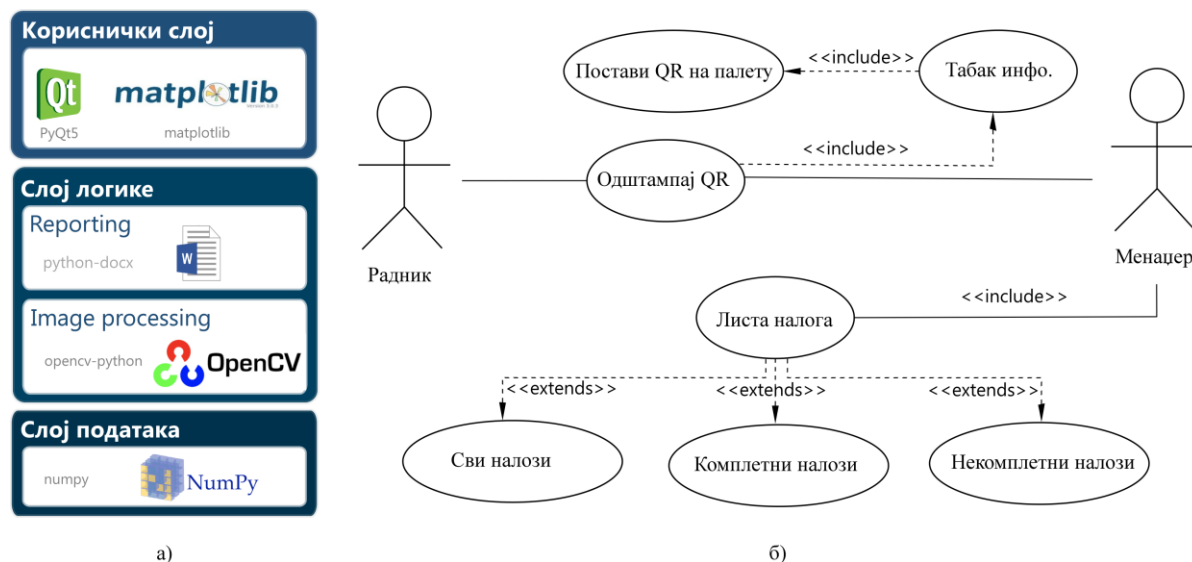
#### 5.4. Опис предложеног решења

У оквиру ове студије случаја постављени циљеви односе се на развој решења (базираног на принципима машинске визије) и испитивање могућности његове примене за препознавање палетираних јединица. Кључни захтеви које решење треба задовољити јесу једноставност коришћења и приступачност, у комбинацији са информационом системом који треба бити у стању да у реалном времену извести о протоку материјала кроз производни простор (ограничени складиштени простор који је покривен видео надзором). Из тог разлога, изложено решење биће базирано на употреби широко доступних интернет (енгл. IP) камера – очекујући да ће верификација таквог концепта проширити могућност његове примене у пракси.

Пошто је реч о комплексном систему, биће заснован на принципу цевовода (енгл. Pipeline). Као што је објашњено у претходним поглављима, то значи да за разматрани проблем неће бити развијено решење које у једном кораку (попут црне кутије) решава проблем; уместо тога, потребно је извршити низ сукцесивних корака. Саставни делови предложеног решења су:

1. Систем за снимање-аквизицију слика,
2. Алгоритми за обраду слика и детектовање QR кодова,
3. Кориснички интерфејс, и
4. Систем извештавања (енгл. Reporting system).





Слика 5.6 Користићене технологије и дијаграм тока. а) Архитектура и технологије коришћене за развој апликације; б) Упрошћени дијаграм тока решења.

У наставку, сваки од горе наведених корака биће детаљно објашњен и илустрован.

#### 5.4.1 Кориснички интерфејс

Приказ основних елемената графичког корисничког интерфејса дат је на слици 5.7. Интерфејс је подељен вертикално, на три колоне, и чине га:

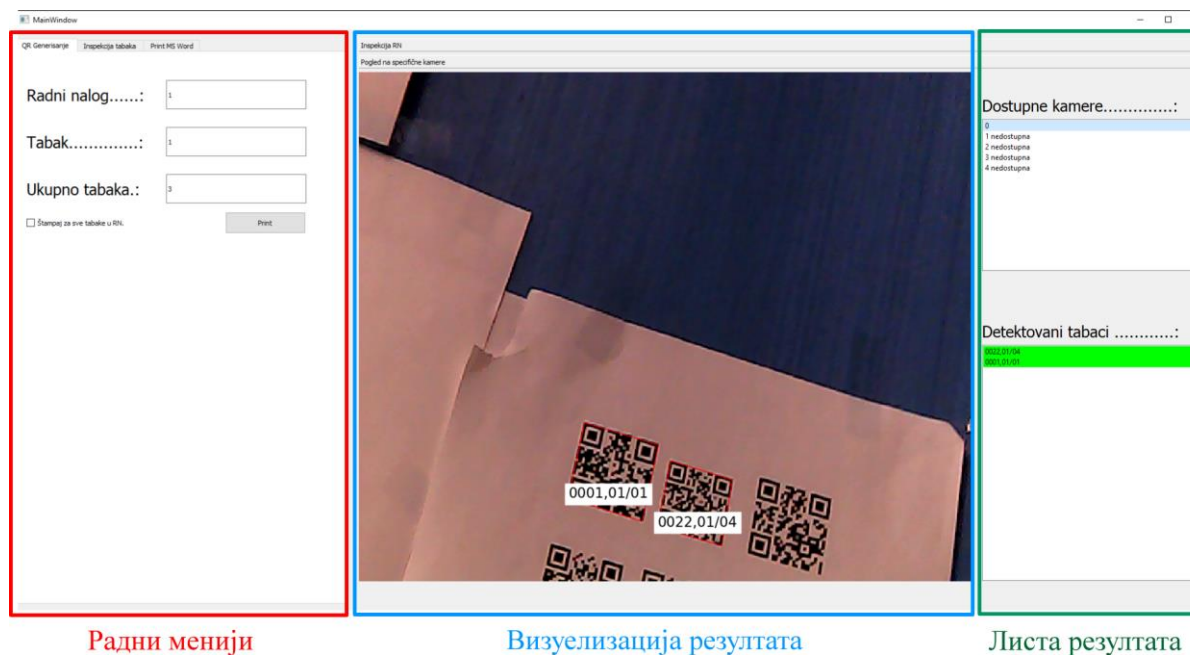
- **Радни менији**, у којима корисник може: а) генерисати нове QR кодове за одговарајуће радне налоге и табак (таб „QR Generisanje”); б) извршити инспекцију табака који су пронађени од стране свих камера (таб „Inspekcija tabaka”); и в) Извршити генерисање и штампање извештаја за цело складиште или појединачне радне налоге (таб „Print MS Word”).
- **Визуелизација резултата**, у којима се врши графичка илустрација – цртање-означавање пронађених табака и радних налога, тако да корисник може лако лоцирати његову позицију на складишту. У оквиру ове студије, имплементирани су могућности визуелизације резултата на једној камери или на панорами која се генерише на основу слика прикупљених са више камера распоређених на различитим локацијама.
- **Листа резултата**, која садржи табеларни приказ пронађених табака.

Дијаграм тока употребе развијеног решења приказан је на слици 5.7-б. Претпоставка је да корисник започиње рад добијањем пакета – радног налога. Пошто радни налог физички представља низ целина (табака) које се превозе на виљушкарима и палетама – потребно је да корисник за сваки табак одштампа одговарајући QR код. При томе, омогућен је унос информација о: 1) радном налогу и 2) табаку – које су садржане у QR коду који се штампа (слика 5.4.1.1 лево). Усвојени формат записа је: “XXXX/YY/ZZ”, где је:

- словима „X“ означен четвороцифрени радни налог (претпоставка је да компанија годишње има мање од 9999 радних налога – поље „Radni nalog“ на слици 5.7),

- словима „Y“ је означен редни број табака у радном налогу (под претпоставком да један радни налог нема више од 99 табака – поље „Tabak“ на слици 5.7),
- словима „Z“ је означен укупан број табака у радном налогу (под претпоставком да један радни налог нема више од 99 табака – поље „Ukupno tabaka“ на слици 5.7).

Додатно, укључена је опција за штампање QR кодова за све табакe једног радног налога (јер је непрактично ручно уносити податке за радне налоге који нпр. имају десет и више табака).



Слика 5.7 Приказ корисничког интерфејса са назначеним главним елементима – деловима радног прозора.

Визуелизација резултата (пронађених QR кодова) врши се у средишњем делу екрана. Начин визуелизације зависи од акције коју корисник предузима. Слика 5.7 приказује пример у коме је корисник одабрао да види све QR кодове са прве камере (камера са редним бројем 0 на слици испод; листа „Dostupne kamere“). Пошто је крајњи циљ лоцирати позицију палете-QR кода – омогућено је да се кликом на QR код у листи „Detektovani tabaci“ само он исцрта на екрану у средини (слика 5.7).

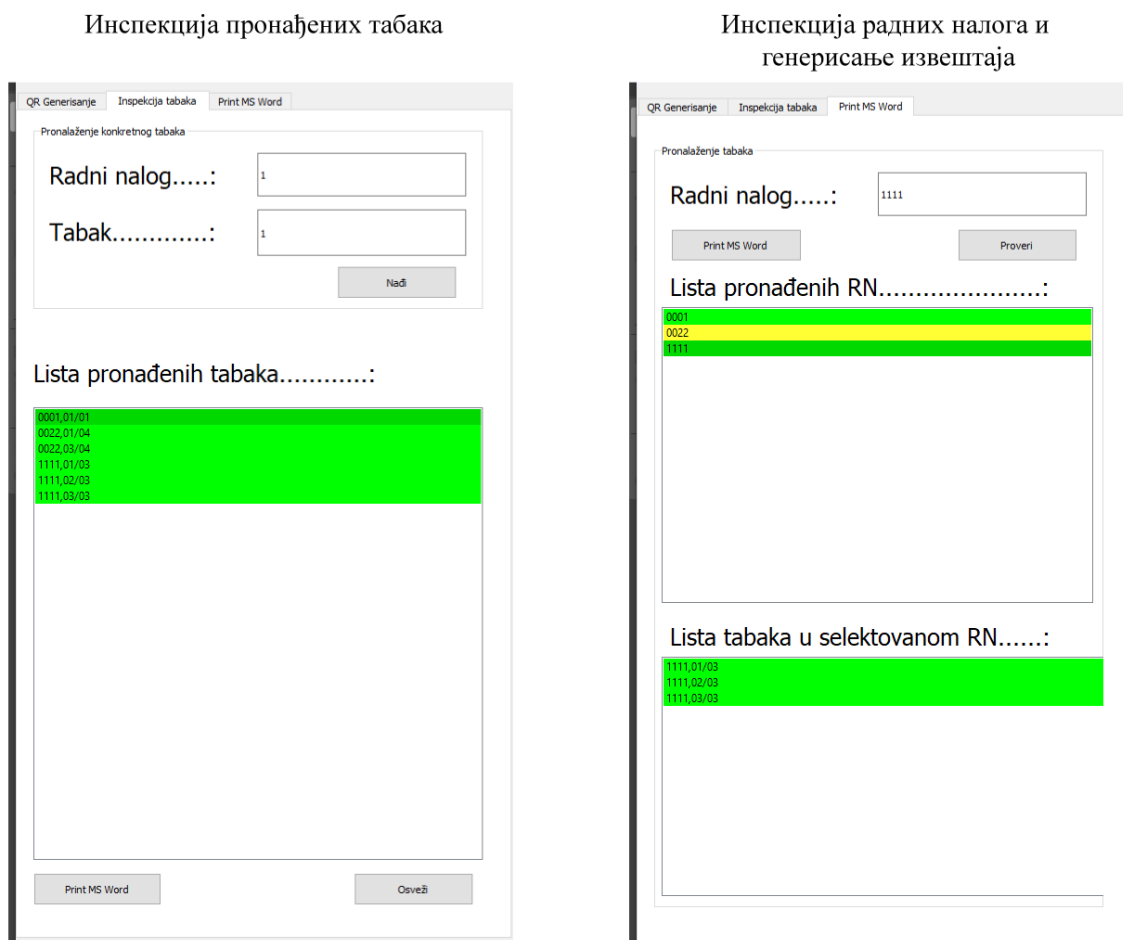


Слика 5.8 Приказ свих табака детектованих на једној камери.



Слика 5.9 Приказ позиције једног-траженог табака на камери.



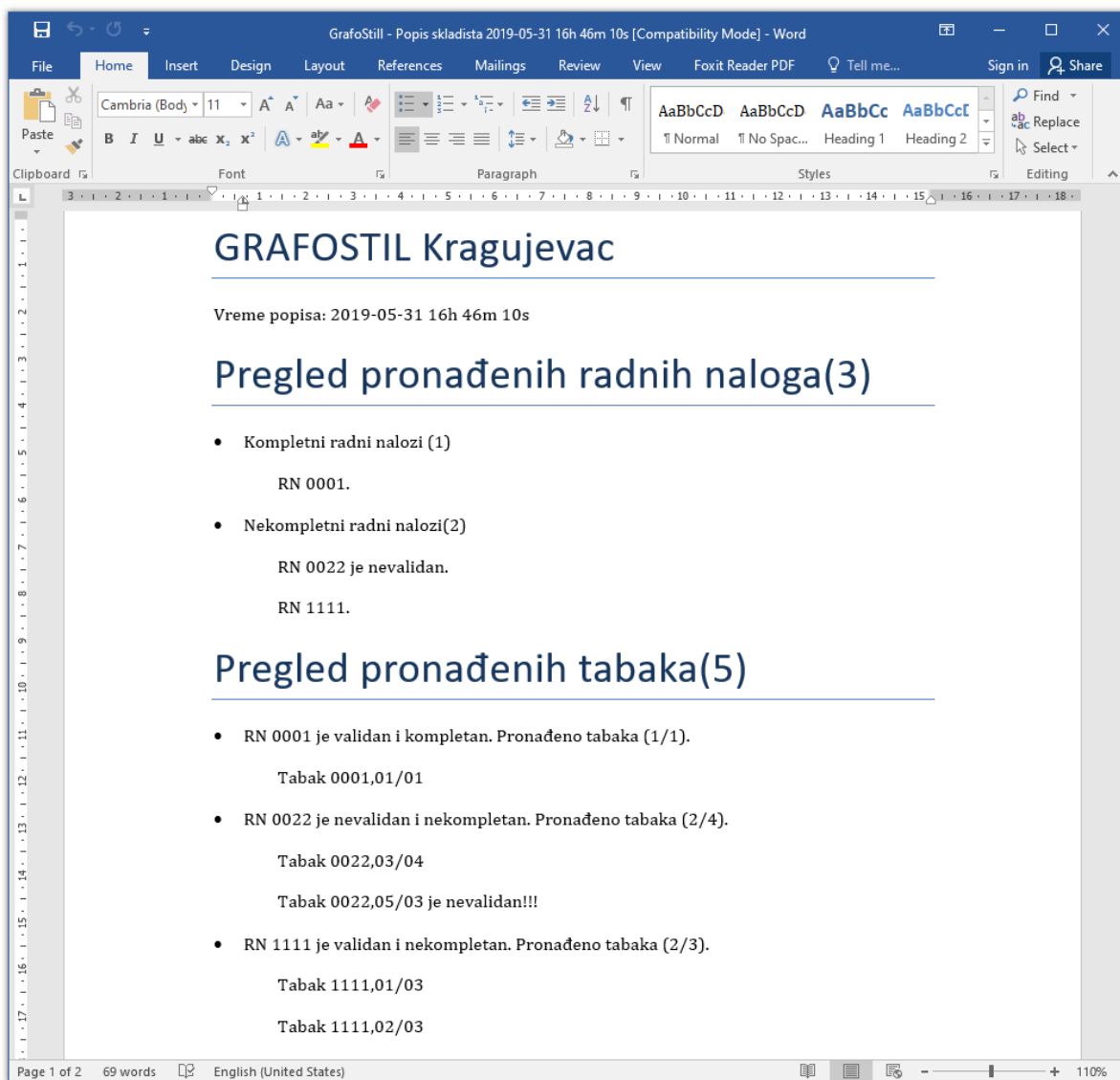


*Слика 5.10 Приказ корисничког интерфејса радних менија са пратећим функционалностима.*

Поред објашњеног таб-менија за генерисање кодова, укратко ће бити објашњена и два престала менија, под називом: „Inspekcija tabaka“ (слика 5.9) и „Print MS Word“ (слика 5.10). Они су развијени са циљем омогућавања брзог проналазка и контроле табака/радног налога од интереса, јер се у пракси дешава да постоје десетине радних налога у једном моменту па ручна претрага није ефикасна. Две кључне функционалности које су потребне запосленима у логистици јесу: брза провера и детекција комплетних/некомплетних радних налога и детекција невалидних табака/налога. Да би се тај посао олакшао, ставке у енгл. List box-овима су обојене одговарајућим бојама: зелена значи да је налог комплетан и валидан, жута значи да су сви табаци радног налога валидни – али нису сви на броју, и црвена боја означава да постоји грешка у радном налогу или табаку (неправилан формат записа и слично).

На слици 5.10 приказан је дијалог за генерисање извештаја о стању – броју табака на складишту. Омогућено је да се уносом информације (редни број) о налогу у поље „Radni nalog“ или кликом на пронађене ставке у „Lista pronađenih RN“ – прикаже листа свих табака тог радног налога (листа „Lista tabaka u selektovanom RN“). У конкретном примеру на слици селеktован је радни налог „1111“ који има укупно три табака – и сви се налазе на складишту („1111,01/03“, „1111,02/03“ и „1111,03/03“). Из тог разлога, радни налог 1111 је обележен зеленом бојом – што индикује менаџменту да је радни налог комплетан и табаци који припадају том радном налогу могу бити транспортовани/коришћени даље у процесу производње (како би се избегао застој и ослободио простор за нове радне налоге). Са друге стране, радни налог „0022“ је

обележен жутом бојом јер неки од табака нису још готови или складиштени у простору покривеном камерама.



Слика 5.11 Пример аутоматски генерисаног извештаја (у лабораторијским условима).

#### 5.4.2 Аутоматско генерисање извештаја о складишту

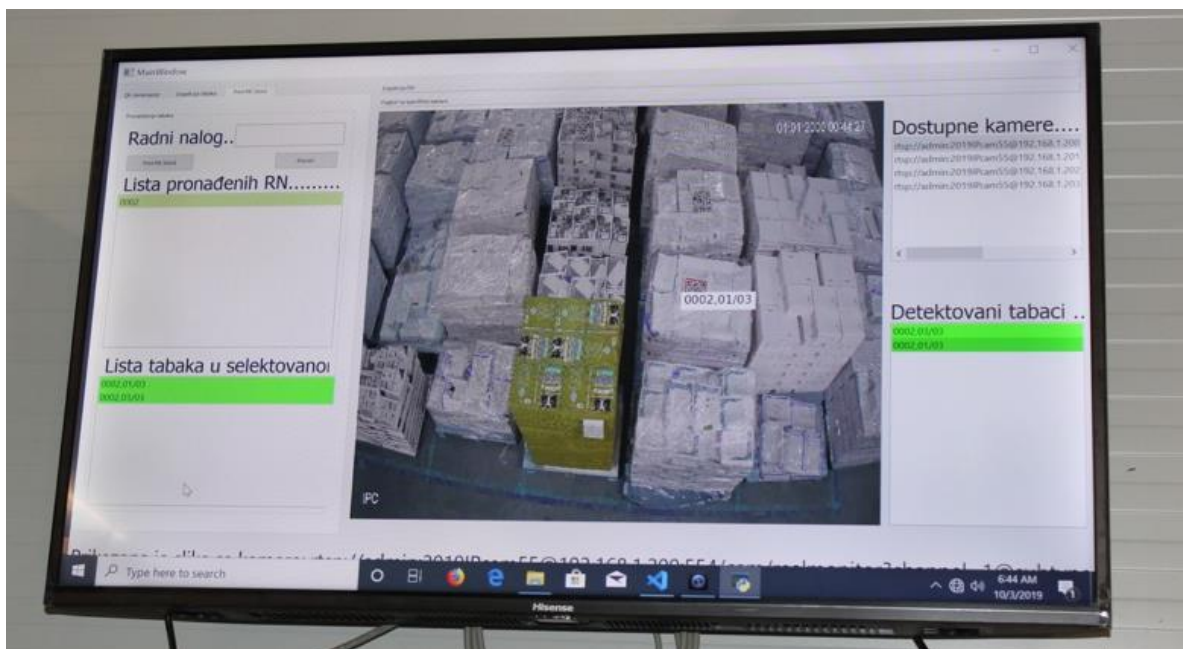
Из перспективе менаџмента, најважнија функционалност јесте генерисање извештаја и праћење протока табака и радних налога на складишту. У оквиру ове студије случаја развијен је софтвер који аутоматски генерише MS Word документ у коме су записане листе свих детектованих табака – распоређених по радним налозима којима припадају. Документ садржи три секције (слика 5.11). У првој се уписују опште информације (датум и време пописа и сл.), информације о радним налозима – прво се даје списак радних налога који су комплетни (јер се они могу и требају први проследити даље ка производњи) а затим и списак некомплетних радних налога; на крају, даје се списак табака и то по радним налозима којима припадају.

### 5.4.3 Приказ имплементираниог решења

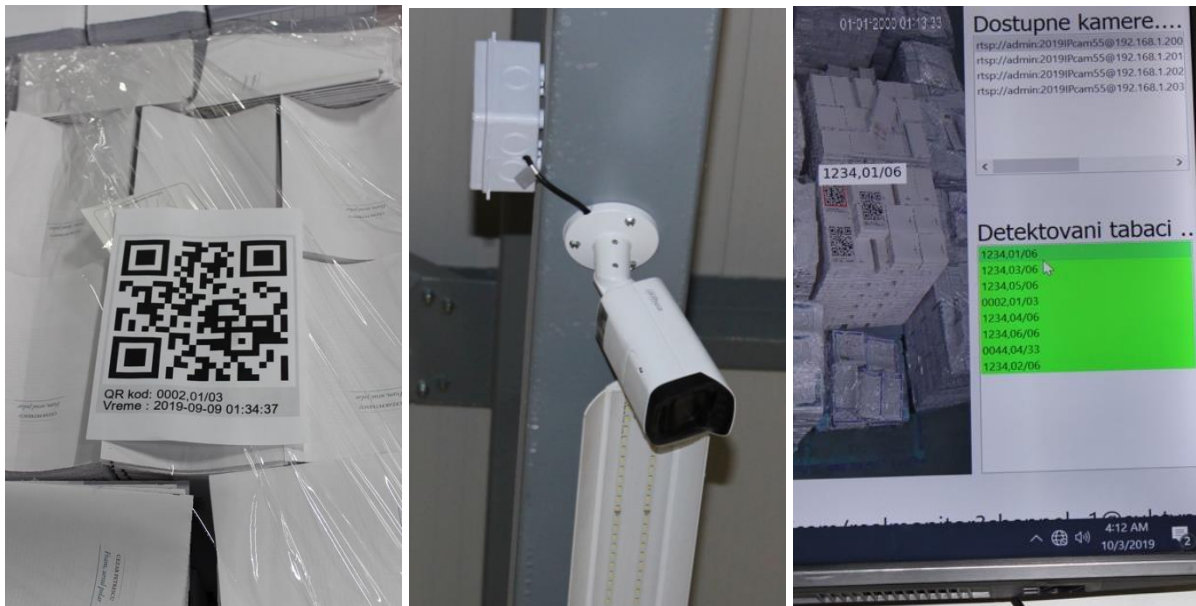
На слици 5.12 приказано је решење инсталирано у производном погону компаније. Са леве стране је кућиште у коме се налази енгл. Switch са персоналним рачунаром и монитор на коме се види простор који покривају четири камере. Са десне стране је мобилни сто-носач и штампач (смештен у кућишту од плексигласа да би се заштитио од прашине и околних услова) и бежичном тастатуром за интеракцију корисника са решењем. У наредне две слике приказан је интерфејс и тренутни резултати употребе софтверског решења.



*Слика 5.12 Изглед имплементираниог решења (мини-серверска станица повезана са IP камерама, монитор великих димензија тако да се види са удаљености у производном погону, и десно – штампач QR кодова са енгл. Touch pad тастатуром).*



*Слика 5.13 Приказ рада софтвера. На слици је приказан тренутак када корисник жели да лоцира табак „0002,01/3“ на складишту.*



Слика 5.14 Приказ QR кода позиционираног на палети и корисничког интерфејса.

#### 5.4.4 Дискусија и анализа предложеног решења

Решења базирана на QR кодовима су једноставна за имплементирање и не захтевају велике ресурсе и улагања за потенцијалне кориснике-предузећа. Студија случаја у овом поглављу реализана је помоћу четири IP камере резолуције 8 мега-пиксела. Наведена пикселажа и број камера представљају довољне ресурсе за покривање простора 10x20 метра са висине од ~4.5 метра (што одговара висини носача конструкције у мањим индустријским халама). У овом раду, QR кодови су штампани на класичном штампачу који се иначе користе у канцеларијама и штампају папир у формату А4. Иако није експериментисано са папирима мањег формата, претпоставка је да се могао користити и професионални QR штампач – што би у конкретном случају повећало трошкове опреме и развоја софтвера. Што се тиче утицаја развијеног система на логистику у разматраном предузећу, пошто се попис софтверски врши у року од неколико секунди – брзина пописа која се постиже је неупоредиво већа од могућности ручног пописа и претраге складишта. Конкретно, на основу искустава и извештаја запослених, ручно тражење недостајуће палете може трајати и до три сата. Из тог разлога, предност дигитализованог система је очигледна и изостављена је статистичка анализа побољшања перформанси каква је приказана у претходном поглављу. Закључак који се наметнуо током ове студије случаја јесте да ће имплементација развијеног система, и сродних технологија, допринети потпуном праћењу и управљању производима кроз све фазе производње. Оптимизацијом и унапређењем производног процеса кроз унапређење праћења и управљања материјалима треба очекивати неколико позитивних утицаја попут повећања продуктивности, смањења залиха, бољег планирања производње, повећања ефикасности опреме, побољшаног протока производње, скраћења производних циклуса, итд. На крају, непотребан транспорт представља један од главних губитака у индустријама и може се оптимизовати увођењем напредних система праћења и управљања материјалима.

## 6. Препознавање небезбедних поступака код радних места која укључују задатке гурања и повлачења терета

Према дефиницији, ергономија је научна дисциплина која се бави проучавањем и прилагођавањем радног места потребама радника (OSHA 3125, Helander M. 2005). Дакле, акценат јесте на адаптацији и креирању радног места у складу са могућностима радника (у циљу повећања безбедности, продуктивности и задовољства) – а не обрнуто. Појмови „ергономија“ и „људски фактори“ су термини који се у данашње време често користе и међусобно преплићу у литератури и пракси. Конкретно, под ергономијом се обично подразумева физичка ергономија, док људски фактори указују на шири појам интеракције запослених у, и са, радним окружењем (когнитивна ергономија, организациона ергономија, ергономија околине, канцеларијска ергономија, итд.) (Karwowski W. 2005). Као што наслов овог поглавља указује – фокус ће бити стављен на физичку ергономију (у наставку – скраћено: ергономију). Ергономија је научно заснована дисциплина која обухвата и примењује знања из низа научних области, као што су: физиологија, психологија, инжењерство, биомеханика, антропологија и статистика са циљем развоја радног окружења и радних места који су комплементарни са људским карактеристикама и могућностима (тако да минимизују физички напор, стрес и остале врсте нелагодности на радном месту). Што се тиче радних места која подразумевају радне задатке гурања и повлачења колица, типичан пример јесу запослени у магацинима и транспорту. Проблем који се јавља услед неергономског извршавања поменутих радних задатака јесу мишићно-коштани поремећаји (МКП), укључујући бол у леђима, рукама, врату, итд<sup>44</sup>. Наведене здравствене последице су подједнако значајан проблем за послодавце и запослене на радним местима. Повреде могу варирати по облику у ком се испољавају, као и по времену колико трају и деле се на: 1) повреде које су тренутне и могу се санирати у предвиђеном року (попут ломова костију, истегнућа и сл.) и 2) повреде које су дуготрајне и често доживотне (узрокујући различите облике инвалидитета и/или неспособности за рад).

Светска здравствена организација је 2017. године означила мишићно-коштане повреде као главни узрок инвалидитета у четири своје регије (МКП су ранкиране као други највећи узрок инвалидитета у источно-медитеранској регији, и трећи у Африци) (World Health Organization 2017). Док преваленца мишићно-коштаних стања варира у зависности од старосне доби и дијагнозе (између 20%-33% људи широм света живи са боловима повезаним са мишићно-коштаним обољењима). Извештај из Сједињених Америчких Држава показује да један од три одрасла становника Америке живи са дијагностикованим мишићно-коштаним стањем/проблемом – што је еквивалентно броју оболелих од кардиоваскуларних или хроничних респираторних болести<sup>45</sup>. Сходно томе, социолошке и економске импликације на државе су велике – конкретно, извештаји показују да су МКП 2011. године буџет Америке коштале 213 милијарди долара, или 1.4% БДП. Извештаји који се односе на територију Европе, указују да 33% радника (32% мушкараца и 24% жена) проводи макар 25% свог радног времена на извршавање ручног посла (који укључује рад са теретом) (Occhipinti E. et al. 2016).

<sup>44</sup> Према извештају Светске здравствене организације (<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions>), МКП обухватају преко 150 клиничких дијагноза које укључују здравствене поремећаје локомоторног система: мишића, костију, зглобова и ткива која их повезују (лигаменти, тетиве, хрскавице итд).

<sup>45</sup> The Impact of Musculoskeletal Disorders on Americans — Opportunities for Action. Bone and Joint Initiative USA. 2016. (<http://www.boneandjointburden.org/docs/BMUSExecutiveSummary2016.pdf>).



Поред тога, 47% радне снаге је изложено раду у неприродном положају макар 25% свог радног времена; а 33% радника у Европи изводи репетитивне послове који укључују активацију горњих екстремитета. Обољења која се могу довести у везу са овим проблемима, према извештајима из 2010, представљају 55% захтева за одсуство са посла (~1.6% годишењег БДП, или ~ 35000 еура по једном случају-повређеном) (EUROSTAT 2010). Из перспективе послодаваца, повреде леђа, врата, и генерално мишићно-коштаног система запослених представљају главни узрок одсуства са посла. То даље узрокује недостатак обучених радника, смањену продуктивност, па самим тим и повећање цене и комплексности производње. Из перспективе радника, повреде поред губитка радног места (или принудне преквалификације) могу имати и дугорочне последице у виду трајних инвалидитета и неспособности за обављање многих уобичајених радњи.

## 6.1. Ергономски ризици при гурању и повлачењу терета

Ризици од повреда на радним местима која укључују гурање и повлачење се могу поделити на две групе: 1) Ергономске (везано за радно место), и 2) Индивидуалне (Karwowski W. 2005).



Слика 6.1 Фактори који утичу на настајање мишићно-коштаних повреда на раду.

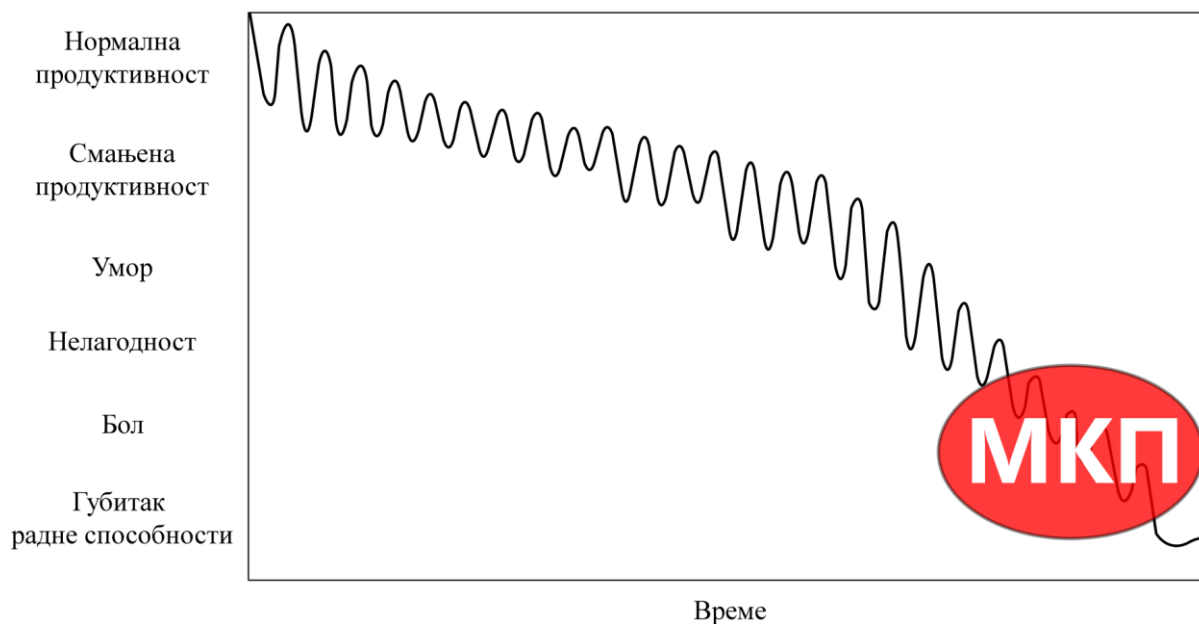
### 6.1.1 Ризици од МКП везани за ергономију радног места

Сматра се да ергономски фактори-ризици играју кључну улогу у настанку повреда на раду – те да их из тог разлога треба што је могуће више смањити (слика 6.1). Генерално, сматра се да је радник изложен ризицима од повреда када год се од њега захтева да изврши радни задатак који подразумева напор изван капацитета и лимита његовог тела-конституције. Три кључна ризика, која су од интереса за процедуре и студију изложеним у овом поглављу јесу:

- 1) Висока фреквенција понављања радног задатка. Типичан пример јесу лоше организовани радни процеси, где се у циљу повећања продуктивности радник преоптерети. Радни задатак се сматра репетитивним уколико је предвиђено време за његово извршавање тридесет секунди, или мање.
- 2) Превелики напор при извршавању радног задатка. Овај фактор ризика је посебно комплексан, јер треба бити дефинисан узимајући у обзир и физичку снагу-спрему оператера – а то није једноставно када су у питању велика предузећа са великим бројем радника (пошто физичка конституција и кондиција веома варирају од човека до човека).
- 3) Неправилни (неприродни) положај тела при извршавању радног задатка. Овај фактор негативно утиче на зглобове и мишиће радника, који могу бити приморани да дуго и често буду у датом (неправилном) положају (слика 6.2).



Слика 6.2 Пример ергономских ризика у пракси.



Слика 6.3 Графичка илустрација процеса настајања и прогреса мишићно-коштаних повреда на послу. Настајење МКП треба схватити као процес „замора материјала“.

### 6.1.2 Ризици од повреда повезани са индивидуалним факторима

Када је радник дужи временски период изложен ризицима од МКП, у првом периоду долази до замора човековог тела. Када замор надвлада способност организма да се опоравља, регенерише и прилагођава – настају повреде. На слици 6.3 приказан је дијаграм тока развоја повреда (и генерално нарушавања здравља) на раду. Фазе развоја болести су генеричке, и важе за све раднике и радна места, али време за које се могу развити болести зависи од следећих индивидуалних фактора:

- 1) Лоше радне навике и радна пракса, попут непридржавања препорука експерата задужених за БЗР, или лоша механика покрета, или лоше анатомске предиспозиције за дати радни задатак (на пример, особа је прениска или превисока за дату радну позицију или машину/алат).
- 2) Лоше здравствене навике-стање, попут пушења, склоности ка алкохолу и слично, или урођене мане, или развијене болести које умањују радну способност и/или повећавају ризике од повреда ако радник борави у датом индустријском окружењу.

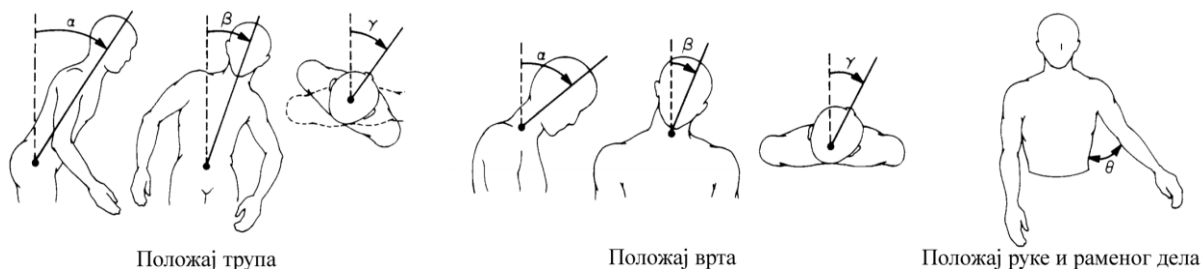
- 3) Лоше физичко стање, попут дехидрираности, гојазности – посебно у развијеним земљама. Типичан индикатор јесте задиханост при мањим напорима, попут пењања уз степенице и слично.

## **6.2. Преглед научне литературе и метода за детекцију и превенцију неергономских поступака на радним местима која подразумевају гурање и повлачење терета**

Индустријска пракса и стандарди деле послове гурања и повлачења на две категорије: 1) померање терета помоћу алата-колица која имају тачкове (ручна колица, виљушкари и сл.) и 2) померање терета без алата са тачковима (котрљање, клизање и повлачење терета) (Swedish Work Environment authority 2012). Ова дисертација је фокусирана на прву групу, али су предложене методе примењиве и на другу групу уз додатна прилагођавања. У том случају, процена ризика подразумева разматрање следећих фактора: 1) Тип колица и тежину која се превози на њима; 2) Положај тела оператера при обављању операције; 3) Начин на који оператер делује рукама на колица тј. рукохват; 4) Оптималност шаблона-правила обављања операције; 5) Растојање које је потребно прећи; 6) Стање у коме се налази опрема којом се обавља радни задатак; 7) Стање пода по коме се колица гурају; 8) Присуство препрека које се могу наћи на предвиђеној путањи; и 9) Остали фактори. Као што се може приметити, већина наведених фактора се не мења или на њих директно не утиче радник својим поступцима и навикама (нпр. за стање подова и опреме је задужена служба одржавања, процесни инжењери су одговорни за одабир оптималне путање и начина транспорта, за оптималан одабир типа колица је одговорна набавка и менаџмент фабрике итд.). Међутим, положај тела у току извођења операције је крајње субјективан и није га једноставно побољшати нити пратити током радног времена. Тренутна пракса јесте да када неко-надређени примети неергономско руковање транспортним колицима упозори оператера – циљ ове студије јесте да се тај задатак аутоматизује и олакша превентивно деловања инжењера БЗР. Генерално, па и за радне задатке који укључују гурање и повлачење колица, тренутне мере за превенцију повреда јесу ротација радника, прављење кратких пауза и извођење вежби за мускуло-скелетни систем. Дакле, очигледна је потреба и примењивост метода које би омогућиле прецизнију идентификацију ризичних поступака и циљано деловање надлежних. У наставку је дат преглед студија које су се бавиле анализом и унапређивањем положаја тела радника при гурању и повлачењу терета.

На слици 6.3, приказани су неприродни положаји (и разматрани параметри-углови) трупа, врата и рамена које су у свом раду из 1992. године анализирали Keyserling et al. (Keyserling W.M. et al. 1993). У питању је била 42-месечна студија у великој корпорацији из области ауто индустрије, у којима су аутори упоредили радне положаје запослених пре и после тренинг-програма. Углови су мерени посебним софтвером чији су улазни подаци били видео-записи радника снимљених у фабрикама. Резултати су показали да су додатни тренинзи имали позитивних ефеката на углове трупа и рамена, док су се измерени углови нагиба врата благо погоршали или остали исти. Закључено је да се предложеном методом могу идентификовати критична радна места, те да је кључ за побољшање била модификација радног места и процеса рада – више него сугестија или обука која се може пружити радницима.





**Слика 6.4** Делови тела и углови разматрани у раду *Keyserling W.M. et al. 1993.*

Процес, односно силе, гурања/повлачења се деле на три дела-интервала, и то: 1) почетна сила (сила потребна да се колица покрену), 2) сила одржавања кретања колица (укључујући заокретање колица) и 3) сила потребна да се колица зауставе. Како је сила потребна да се колица покрену по правилу доста већа од сила потребних да се колица гурају (држе у покрету) или зауставе – у литератури је прихваћено да се евалуација ризика од повреда и оптимизација радног места врши према почетној сили (Resnick, M.L. et al. 1995). У литератури се може наћи велики број студија које се баве истраживањем корелације силе гурања и различитих фактора везаних за радника и радно место. Lin et al. су експериментима, у које су укључили пет мушкараца и жена, утврдили да пол не утиче битно на факторе ризика од повреда при гурању и повлачењу колица (Lin C.-L. et al. 2010). Поред важности правца сила (повлачења/гурања), наведена студија је утврдила да пречник точкова на колицима битно утиче на вредност почетне силе, као и висина на којој се налазе ручке-рукохвати. Конкретно, измерене силе су биле мање за висину 115cm него за 101.5cm; односно, за пречник точкова од 15.3cm него за колица са пречником точкова од 20.3cm. У студији из 2002. године, Laursen и Schibye су испитивали утицај различитих подлога на биомеханичко оптерећење које трпи људско тело при гурању и повлачењу (Laursena B. et al. 2002). Студија је укључивала седам радника градске чистоће који гурају колица на два точка, односно на три различите подлоге (тротоару, каменим плочама и трави), и три различите врсте терета (12.5, 25, 50 kg) и нагиба колица – а мерени су моменти у раменима, сила компресије у лумбалном делу кичме. Утврђено је да су компресионе силе у лумбалном делу испод 1800N а смичуће испод 200N у свим ситуацијама, док је максимална вредност момента у раменом делу била 80Nm. Подлога се показала као значајан фактор на силе које делују у лумбарном делу, док варијација тежине није битно утицала (али јесте на почетну силу и рамени део мишића). Слична студија извршена је 2015. године, у којој су de Ponte et al. на основу мерења осамнаест мушких испитаника (старости ~21 годину), који гурају модификована колица доступна у супермаркетима, утврдили да на оптерећење мишића делује положај-трајекторија подлактице и ручног зглоба (de Ponte Á. M. et al. 2015). Поједине студије су предложиле максималне дозвољене силе при гурању и повлачењу. На основу експеримента над осам испитаника, Haslam et al. су препоручили да то буде опсег од 410N до 449N, зависно од глаткоће подлоге (Haslam R.A. et al. 2002). Такође, доступни су и холистички приступи (базирани на стандардима), који за циљ имају превенцију биомеханичке преоптерећености запослених на послу Occhipinti E. et al. 2016. У студији из 1998. године, истраживана је оптерећеност мишића при аксијалном увијању торзоа човека (активација мишића која се дешава приликом заокретања колица) (Marras W.S. et al. 1998). Употребом опреме за мерење електромиографске активности десет мишића (код дванаест испитаника) анализирано је увијање трупа код човека при различитим положајима тела (када је труп усправан, нагнут напред, у страну итд.). На основу добијених резултата, закључено је да се резултати добијени код испитаника у усправном положају у значајној мери

разликују од оних у другим положајима тела – те да се препоруке и студије које занемарују поменути варијабилност положаја тела требају узети са резервом.

У прегледу литературе коју су дали Jung et al., закључено је да су студије на тему гурања и повлачења колица сувише хетерогене, па да се због тога не могу дати генералне препоруке – већ је потребно направити посебне ергономске препоруке за различите типове колица и индустрија у којима се користе (Jung M.-C. et al. 2005). Kuijjer et al. су на основу прегледа литературе предложили низ образаца за рачунање максималне силе за различите делове тела, за различите типове колица и индустрија (узимајући тежину као кључни параметар) (Kuijjer P. et al. 2007). Schaefer et al. изложили су комплекснији модел, који у обзир узима карактеристике оператера (године, пол и стас-грађа) и радног задатка (тежине, фреквенције и растојања које треба савладати) (Schaefer P. et al. 2007), који је базиран на (ISO FDIS 11228-2, 2006) и DIN EN 1005-3, 2002 стандардима. Thaedo et al. су предложили EMG-базирани биомеханички модел који би омогућио персонализоване управљање ергономским ризицима при гурању и повлачењу колица (Theado E.W. et al. 2007).

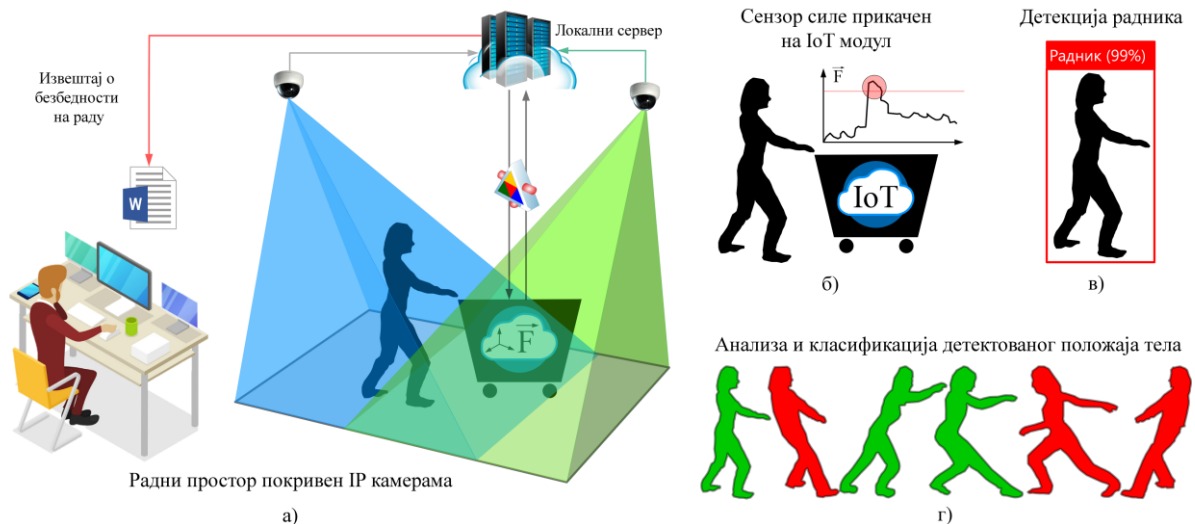
У студији Giagloglou et al. гурање и повлачење колица су испитивани са психофизиолошког аспекта (Giagloglou E. et al. 2017). Сличну студију спровели су Garg et al., који су приметили да се не може поуздано утврдити да ли радницима више одговара да задатке померања терета изводе гурањем или повлачењем (Garg A. et al. 2014). Ciriello et al. су извели још један сличан експеримент, у коме је учествовало осам индустријских радника који су понављали две сесије од 120 гурања колица на подлогама са ниским и високим трењем (Ciriello V.M. et al. 2001). Циљ ове психофизичке студије је био да радници пруже одговор на питање који радни услови им делују као одговарајући за предвиђено радно време од осам сати (без ризика од појаве осећаја умора, задиханости, преоптерећености и сл.). Резултати су показали да је максимална дозвољена сила на глатким подлогама мања за 30%, а да је време потребно да се радни задатак изведе 62% дуже због клизаве подлоге којој је радник изложен. Разлике између вертикалних и хоризонталних компоненти сила нису биле статистички значајно различите. Аутори су закључили да ергономске стратегије и препоруке требају узети у обзир одржавање и одабир подлоге тако да се максимизују психофизичке могућности оператера да извршава дати радни задатак. Утицај радног искуства показао се као још један битан фактор који снижава ризик од повреда – јер током времена и обуке запослени стичу навике-вештине ефикаснијег кретања и ангажовања мишићних група (Lee J. et al. 2014). Дакле, психофизичке студије показале су да нема коначног одговора на питање да ли радницима више одговара гурање или повлачење колица.

Што се тиче пилара и Индустрије 4.0, постоји велики потенцијал за њихову примену и прилагођавање у циљу побољшања безбедности и здравља радника који извршавају репетитивне радне задатке и задатке који укључују гурање и повлачење терета. Perpoloni et al. су предложили носиви (енгл. Wearable) систем који омогућава процену ризика за биомеханичко оптерећење организма човека на радном месту (Perpoloni L. et al. 2016). Систем има седам степени слободе, и погодан је за употребу у контролисаном-лабораторијским условима – па је могући сценарио употребе оптимизација ергономије радног места, а не употреба у реалним условима. Студија Sánchez et al. предложила је употребу алгоритама вештачке интелигенције за предвиђање појаве повреда на основу ризика и подложности радника повредама мишићно-коштаног система (Suárez Sánchez A. et al. 2016). Алгоритми су развијени на основу базе података, која је сачињена на основу упитника у којима су радници износили своје симптоме током времена. У прегледу литературе који је обухватио преко 3000 радова у периоду од 1997. до 2017. године, детаљно је анализирана примена

вештачке интелигенције у области биомеханике покрета (Halilaj E. et al. 2018). Анализа је показала да је већина (80%) студија била фокусирана на предикцију повреда: 80% на класификацију, 11.6% регресију-естимацију и 7.8% на кластеровање-груписање потенцијално угрожених партиципаната (број субјеката-података у овим студијама варирао је од 4 до 2956, са медијаном од 40). Претходне студије су показале да побољшања физичке ергономије позитивно утичу и на квалитет рада, посебно у земљама у развоју (Yeow P.H.P. et al. 2003). Међутим, немогућност правовремене и објективне визуелне детекције неергономских положаја тела забележен је као озбиљан проблем у разним областима привреде. На свим радним местима која подразумевају гурање колица, почевши од медицинских сестара у здравству које превозе пацијенте на колицима (Waters T. et al. 2011), запослених у авиоиндустрији (стујардресе) (Jäger M. et al. 2007), до радника у дрвној индустрији (Grzywiński W. et al. 2016), утврђена је корелација између старости и броја регија (нпр. колена, лактови, леђа) у којима су радници пријавили болове и нелагодности. Препорукама су одређени-ограничени растојање и тежине гурања, међутим, проблем визуелне контроле и препознавања неергономских положаја тела у индустријским условима остаје и даље без одговора – препуштен мануелном и субјективном доношењу одлука и препорука. У наредној секцији, биће изложено решење базирано на примени алгоритама машинске визије и интернет ствари – које има за циљ олакшавање и аутоматизацију детектовања небезбедних поступака гурања и повлачења колица у индустријском радном окружењу.

### 6.3. Преглед предложеног решења

Концепт предложеног решења је графички приказан на слици 6.5. Саставни делови решења су: 1) Колица са сензорима силе, који су повезани на 2) IoT модул, који комуницира са 3) Локалним сервером који на захтев IoT модула обрађује слике-фрејмове са 4) Интернет (енгл. IP) камере. Претпоставка је да је радни простор покривен интернет камерама (слика 6.5-а). Такође, радник несметано обавља задатак гурања и повлачења, при чему су на колицима постављени сензори силе. IoT модул има задатак да у реалном времену прати-мери вредности силе, и да детектује моменте када они пређу критичну вредност (слика 6.5-б). Ова критична вредност треба бити дефинисана сходно индустријским препорукама и пракси, и као што је речено у претходној секцији одговара моменту покретања колица када је сила којом радник делује на колица највећа. Дакле, полазна претпоставка је да ако је вредност вучне силе мала – ризик да се радник повреди је мали без обзира на положај у коме се налази тело радника. Из тог разлога вредност критичне (енгл. Threshold, црвена линија на слици 6.5-б) силе ће у наставку бити дефинисана додатно рестриктивно (80% од прописане вредности).



Слика 6.5 Делови тела и углови разматрани у раду Keyserling W.M. et al. 1993.

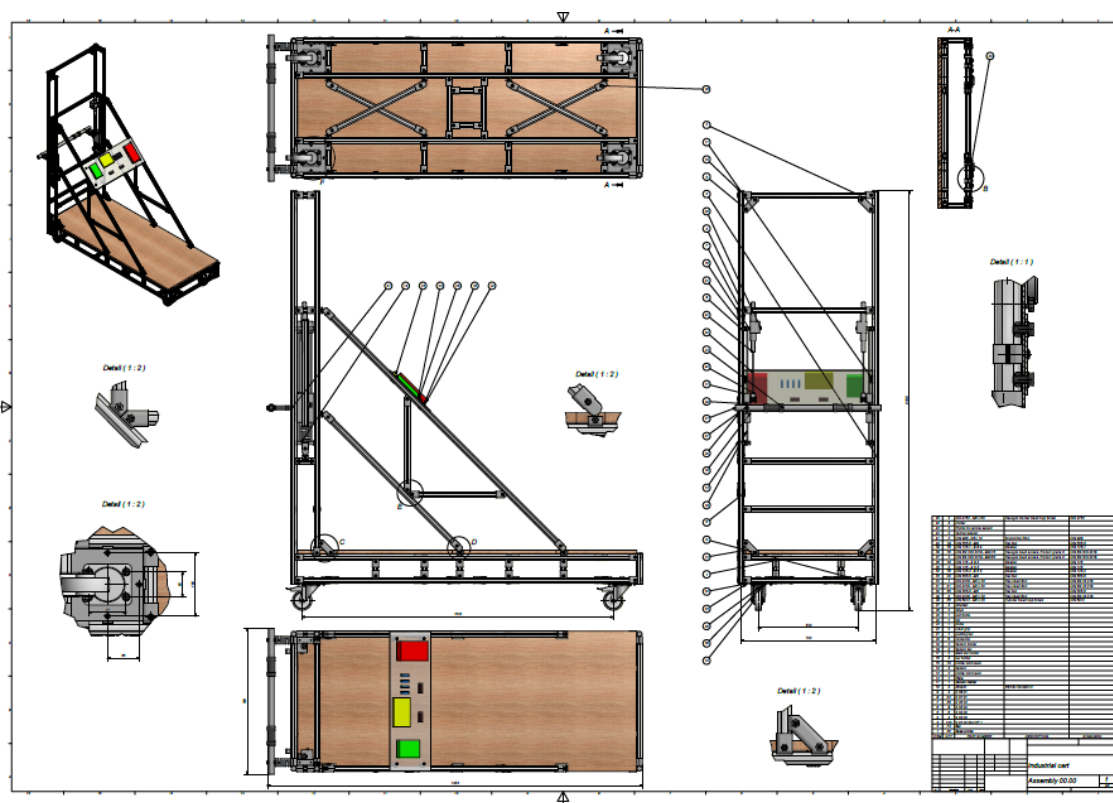
IoT модул има функцију филтера и прекидача из два разлога: 1) Компјутерски је неефикасно пратити радника у сваком моменту и 2) Као што је објашњено, од интереса су само моменти<sup>46</sup> када је радник извршио небезбедни (неергономски) потупак. IoT модул комуницира са локалним сервером преко TCP протокола, и када детектује силу већу од критичне шаље захтев (енгл. Request) ка серверу заједно са информацијом којом је силом деловао радник на колица, у ком тренутку и у ком правцу (да ли је било гурање или повлачење). Локални сервер, поред комуникације са IoT модулом има улогу система за надгледање (NVR - Network Video Recorder) на коме се врши снимање преко IP камере које су прикључене на мрежу. Пошто сервер добија информацију када је IoT модул забележио прекомерну вредност силе на сензору (секција 6.3.1), на основу ње може анализирати фрејмове који одговарају управо том тренутку времена (у реалном времену, или накнадно). Након што је познат тренутак времена и фрејмови који њему одговарају, систем има за циљ да препозна радника и да одреди положај његовог тела (секција 6.3.2). Под тим, подразумева се одређивање кључних (енгл. Landmark) тачки људског тела: зглобови на екстремитетима (руке, ноге) и лица (очи, усне). На основу кључних тачки могуће је даље извршити тродимензионалну реконструкцију – чиме се добија оријентација појединих делова тела у протору.

### 6.3.1 Мерење силе гурања и повлачења

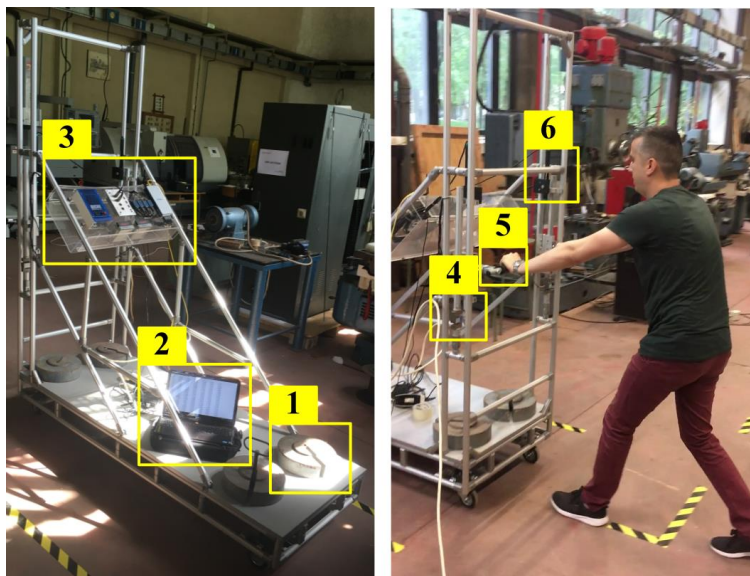
За потребе експерименталне валидације предложене методологије коришћена су наменски-направљена колица са сензорима и електроником потребном за мерење сила гурања колица, која су претходно коришћена у раду Giagloglou E. et al. 2015. На слици 6.6 приказан је технички цртеж колица, док је на слици 6.7 приказана слика колица у лабораторији – са оптерећењем од 100 килограма (тегови). Колица су направљена од алуминијумских профила, при чему је конструкција направена тако да се висина ручке може мењати и прилагођавати раднику. У овом раду, узето је да је висина 115cm. На

<sup>46</sup> Ако посматрамо један радни циклус, можемо приметити да: 1) радник покрене колица (~2 секунде) на месту означеном са словом А, 2) радник гура колица од места А до места Б (рецимо 15 метара, или 20 секунди), и 3) радник зауставља колица (~4 секунде). Ако се узме у обзир број радника, може се видети колико је ефикасније „филтрирати“ и селекувати само оне моменте који су потенцијално ризични-битни.

колица су стављена четири тега од по 25kg (слика 6.7 анотација 1), док је тежина самих клица око 30kg. Помоћу рачунара (слика 6.7 анотација 2) врши се мерење сигнала на наменски направљеном мерном уређају (слика 6.7 анотација 3) – на који су повезани сензори за мерење сила. Конструкција колица је наменски прилагођена тако да је шипка (којом радник управља колицима) преко сензора сила повезана са остатком конструкције. На тај начин се мери вертикална и хоризонтална компонента за леву и десну ручку – на основу којих се може даље израчунати резултујућа сила за обе ручке, илу укупне силе којом радник делује на колица. Што се тиче мерног процеса, систем мери силу преко Wi-Fi модула. Када сила пређе дозвољени максимум, позива се функција на рачунару (серверу) који има приступ и уређају-систему за снимање (видео надзор). Након тога се врши анализа исеченог снимка, и то десет секунди пре и после момента када је детектовано прекорачење вредности силе. Анализа снимка се врши позивањем алгоритма описаног у наставку поглавља (секција 6.3.2).



Слика 6.6 Технички цртеж колица коришћених у експерименталне сврхе (Giagloglou E. et al. 2015).



*Слика 6.7 Изглед колица са мерном опремом у лабораторији (1-тегови, 2-рачунар, 3-мерни инструмент са Wi-Fi конекцијом, 4,5-сензор силе, 6-сензор положаја ручке).*

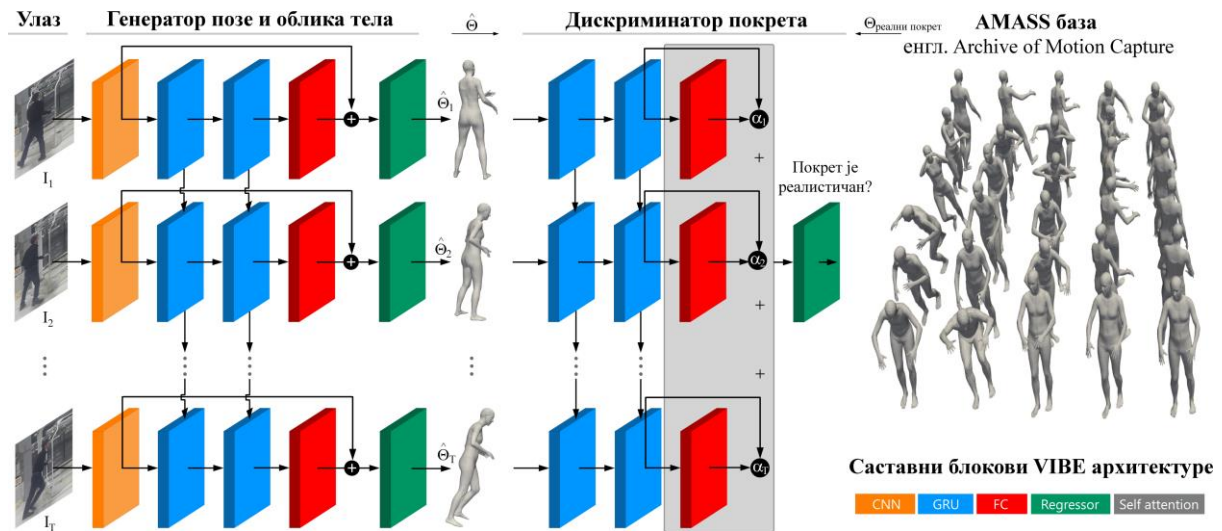
### 6.3.2 Тродимензионална реконструкција тела човека на основу монокуларних слика

Процена и реконструкција тродимензионалног положаја тела (енгл. Pose estimation) човека на основу енгл. RGB слика је предмет истраживања већ три деценије. Потребне прецизног одређивања положаја тела човека су велике у разним областима привреде и науке, а најпознатији примери примене су: проширена стварност, филмске анимације и индустрија видео игара, роботика, ергономија, спорт итд. У питању је област компјутерске визије која се бави проблемом детекције и праћења енгл. Landmark тачки човековог тела (нпр. зглобови, глава итд.), и одређивања оријентације камере (матрице пројекције) – са циљем добијања прецизне тродимензионалне геометрије тела човека. Пошто је људско тело флексибилно, и поједини делови могу бити тренутно заклоњени – за многе области примене и услове коришћења, тренутно не постоје стабилна решења и алгоритми.

Постоји више основа по којима се могу поделити постојећи приступи у решавању датог проблема, али у општем смислу, разликују се енгл. 2D и 3D Pose estimation. Код одређивања дводимензионалне позе човека циљ је одредити локацију карактеристичних тачки (енгл. Landmark points) на основу слике-тренутне сцене. Ово је доста лакши задатак у поређењу са тродимензионалном реконструкцијом, где се поред одређивања положаја тела на дводимензионалним сликама морају одредити и параметри и матрице неопходни за тродимензионалну реконструкцију. Обе наведене поделе (мада се примарно односи на 2D Pose estimation), се могу поделити у две подгрупе – на основу приступа-техника којима се одређује скелетон тела човека, и то на: енгл. 1) Top-down и 2) Bottom-up. Код Bottom-up приступа, прво се врши детекција карактеристичних тачки (нпр. руке, ноге, зглобови итд.) а затим се на основу њих врши естимација положаја тела. Код Top-down приступа је обрнуто, прво се врши детекција регија у којима се налазе људи-тела, а затим се у оквиру тих регија врши естимација положаја кључних тачки и скелетона. У оквиру овог рада, акценат је на Bottom-up приступу. Што се тиче реконструкције 3D положаја тела човека, дуго времена се



реконструкција базирала на употреби калибрисаних камера и епиполарне геометрије. Међутим, методе базиране на дубоком учењу (енгл. Deep learning) последњих година су показале доминантност над традиционалним методама, и из тог разлога фокус ће бити на њима.



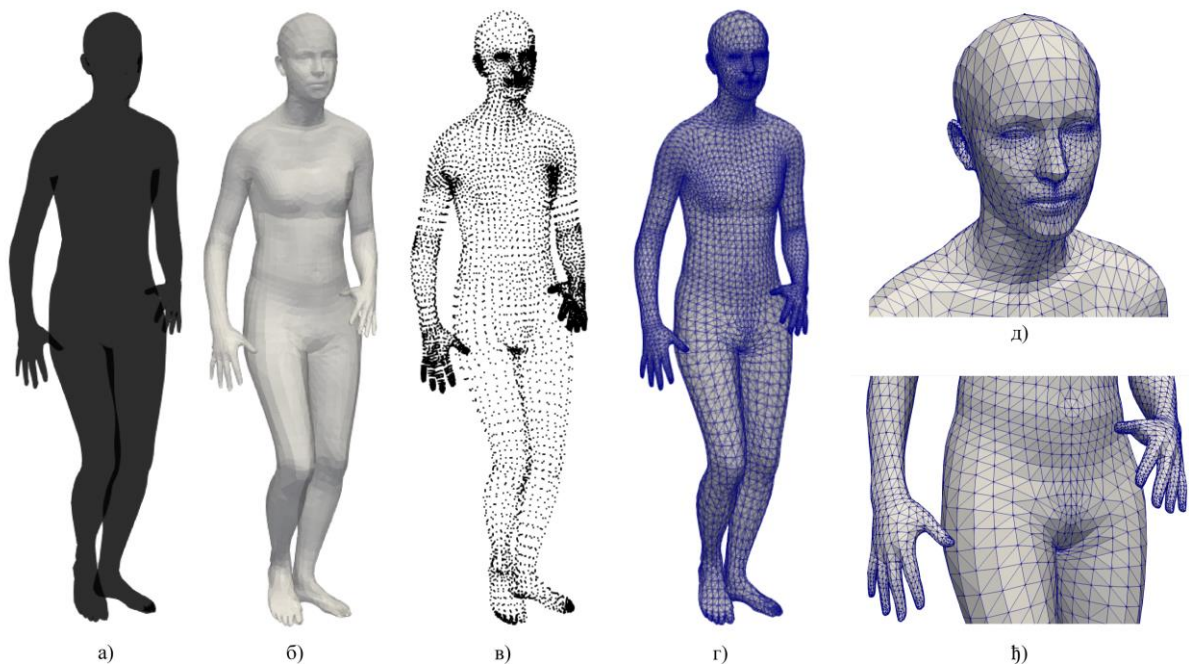
Слика 6.8 VIBE архитектура (скраћенице и називи саставних блокова су на енглеском зато што су то стандардне термини у литератури).

Од интереса за ово поглавље су методе дубоког учења фокусиране на реконструкцији положаја тела на основу једног погледа (монокуларних слика) (Bogo F. et al. 2016, Guler R.A et al. 2017, Huang Y. et al. 2017, Kanazawa A. et al. 2019, Pavlakos G. 2018). Основни разлог зашто је тежиште одмах пребачено на реконструкцију положаја тела из монокуларних слика јесте претпоставка да се решење сматра непримењивим уколико захтева распоређивање великог броја камера у производном окружењу. Додатно, од интереса за овај рад су методологије фокусиране на анализу покрета (не само положаја тела у једном моменту), јер се закључак о ергономичности поступка може донети на основу анализе човекових акција а не на основу тренутног-статичног положаја тела. Пошто је веома компликовано прикупити довољну количину аотираних података (мисли се и на 2D слике и тачан 3D положај човека који одговара тим сликама), показало се да многи алгоритми развијени коришћењем података прикупљених у лабораторијским условима не постижу исте перформансе када се примене на слике које су направљене на отвореном простору и у свакодневним спољашњим условима. У овом раду употребљена је метода енгл. VIBE (Kocabas M. et al. 2020), која за решавање поменутог проблема користи енгл. Adversarial приступ учења – тако што естимира позу на основу независно детектованих дводимензионалних кључних тачки и базе реалних 3D људских облика-анатомија и акција. Изводљивост оваквог приступа је могућа јер тренутно постоје јавно-доступни и аотирани подаци за детекцију 2D кључних тачки (као и велики број архитектура дубоких неуронских мрежа развијених за решавање датог проблема), али и скуп података прецизно 3D-скенираних људских анатомија-силуета. Конкретно, мисли се на енгл. AMASS скуп података, који се показао довољним за учење алгоритма да препознају покрете људи (Mahmood N. et al. 2019). VIBE алгоритам учи да естимира секвенцу 3D поза на основу 2D кључних тачки, тако да дискриминатор мреже не може уочити разлику између предвиђене акције и акције у AMASS бази (која садржи 11000 покрета, односно 300 субјеката). На тај начин, обезбеђује се да су реконструисани покрети природни и „течни“ (без наглих и неприродних покрета). Детаљан опис VIBE алгоритма дат је у

наставку, пратећи терминологију и номенклатуру из оригиналног рада (Kocabas M. et al. 2020).

### 6.3.3 VIBE алгоритам

Људско тело је представљено енгл. Skinned Multi-Person Linear (SMPL) параметарским моделом (Loper M. et al. 2015), који омогућава дефинисање тродимензионалне геометрије (мреже од 6890 чворова у форми квад-елемената) различитих људских конституција у природним позама. SMPL модел људског тела има 82 параметра  $\Theta$ , и груписани су на: 1) параметре позе  $\theta \in \mathbb{R}^{72}$  (који одређују ротацију тела, односно 23 тачке које описују саставне делове скелетона), и 2) параметре облика-конституције тела  $\beta \in \mathbb{R}^{10}$ , који представљају првих десет линеарних параметера људског тела у PCA (енгл. Principal Component Analysis) простору. Дакле, на основу 82 наведена параметара добија се диференцијабилан модел тела  $M(\theta, \beta) \in \mathbb{R}^{6890 \times 3}$ . Употребом претходно обученог линеарног регресора, одређују се кључне тачке тела  $\hat{X}(\Theta) = WM(\Theta)$  у 3D простору. Под претпоставком да су параметри пројекције познати, 2D пројекција кључних тачки на слику се може израчунати као:  $\hat{x} \in \mathbb{R}^{23 \times 2} = s\Pi\left(R\hat{X}(\Theta)\right) + t$ , где матрица  $R$  описује ротацију,  $\Pi$  ортографску пројекцију,  $t$  транслацију и  $s$  скалирање.



**Слика 6.9** Илустрација енгл. SMPL модела људског тела. а) Силуета (каква се види након сегментације особе на слици); б) Површински модел; в) Чворови; г) Тространа (енгл. STL) мрежа; д и е) Приказ нивоа детаља и квалитета мреже на појединим деловима тела.

Графичка илустрација VIBE архитектуре дата је на слици 6.9. Укратко, VIBE врши естимацију параметара SMPL модела тела човека за сваки фрејм користећи енгл. Temporal generation network модул  $G$ , који је трениран заједно са дискриминатором покрета  $D$  (при чему дискриминатор има увид у велику базу покрета у SMPL формату). Улога темпоралног енкодера јесте да при процесирању тренутног фрејма



искористи информације из суседних-околних фрејмова, што је од користи када су поједини делови тела привремено заклоњени или се не виде оптимално из тренутног угла. На тај начин се осигурава да целокупан покрет има природнији и реалистичнији изглед. Почетни блок је сачињен од ResNet-50 (He K. et al 2016, Kolotouros N. et al. 2019) конволуционих блокова  $f$ , који за улаз има низ од  $T$  фрејмова-слика  $I_i$  и враћа атрибуте  $f_i \in \mathbb{R}^{2048}$  за сваки од њих (у овом раду је  $T = 16$ ). Поменутих 2048 атрибута се шаље на улаз два енгл. Gated Recurrent Unit (GRU) блока (Cho K. et al. 2014). GRU блокови (или енгл. GRU Units) развијени су са циљем да се унапреди анализа секвенци (у нашем случају секвенца је низ поза детектованих на низу слика). Наиме, често се услед разних шума и варијација улаза дешава да се у појединим моментима добија нетачна и нелогична предикција; што често изазива негативан ефекат узимајући у обзир да је алгоритам на претходним фрејмовима радио тачно. Овај проблем се још назива „проблем кратке меморије“ (енгл. Short memory problem), јер оставља утисак да неуронска мрежа није свесна својих претходних стања и одлука – па прави нелогичне предикције (које остављају утисак неприродних покрета). GRU враћа низ тзв. латентних вектора атрибута  $g_i(f_i), i = 1..T$ , који се користе као улази  $T$  регресора који (почевши од усредњене позе) налази параметре  $\hat{\Theta}_k \in \mathbb{R}^{85}$ , који садрже параметре SIMPL позе, облика тела и параметре матрице камере потребне за реконструкцију (Kanazawa A. et al. 2018). SIMPL регресор има два енгл. Fully connected (FC) слоја од по 1024 неурона, и завршног слоја са 85 неурона који одговарају броју параметара  $\hat{\Theta}$ . Функција циља има четири компоненте:  $L = L_{3D} + L_{2D} + L_{SIMPL} + L_{adv}$ , где је  $L_{3D} = \sum_{t=1}^T \left\| X_t - \hat{X}_t \right\|_2$

грешка 3D позе,  $L_{2D} = \sum_{t=1}^T \left\| x_t - \hat{x}_t \right\|_2$  је грешка пројекције добијенте 3D позе

пројектоване на 2D слику (на којој су детектоване 2D кључне тачке) и  $L_{SIMPL} = \left\| \beta - \hat{\beta} \right\|_2 + \sum_{t=1}^T \left\| \theta_t - \hat{\theta}_t \right\|_2$  је грешка позе и облика тела. Прве три компоненте

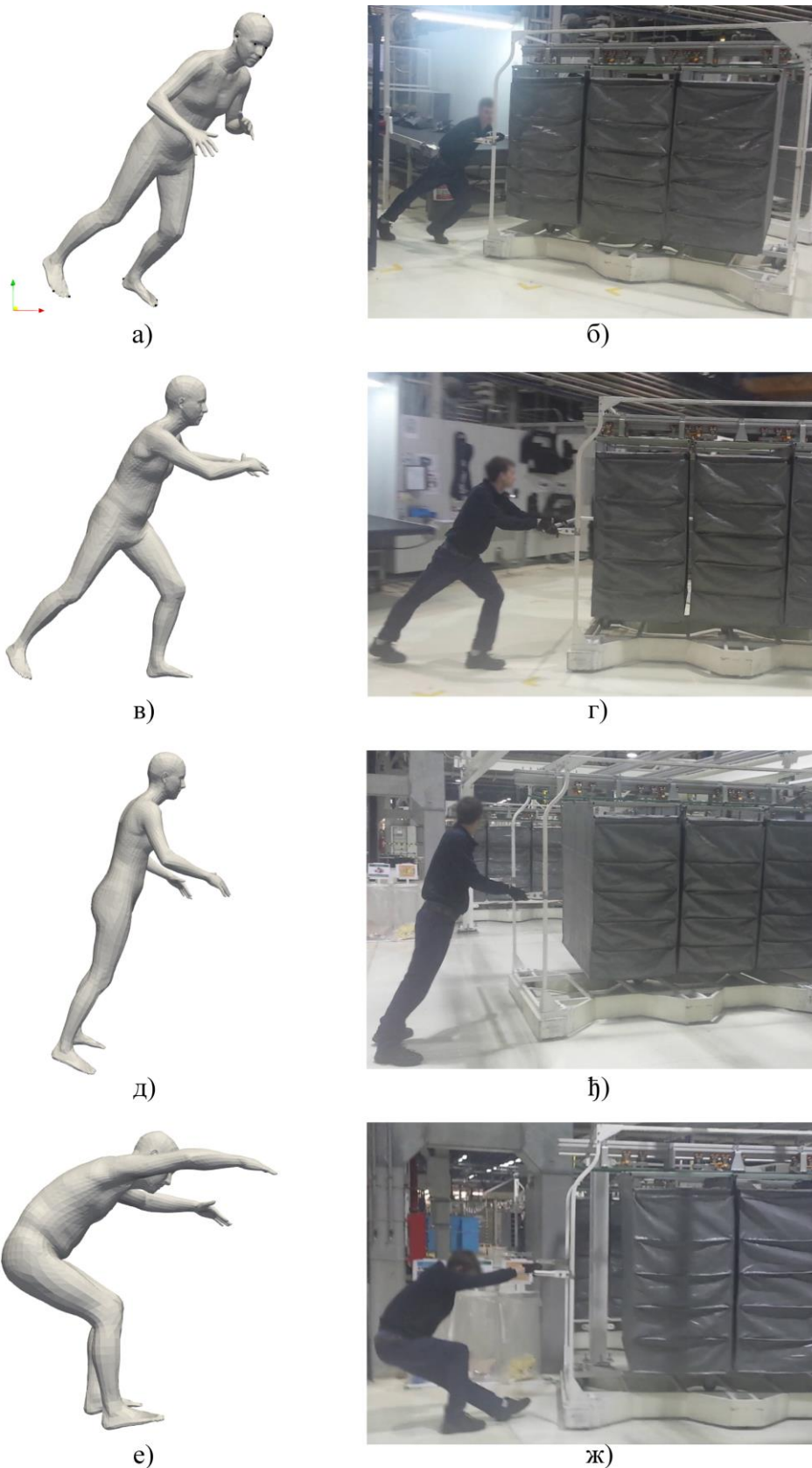
имају за циљ да осигурају да се добијена реконструкција поклапа са пројекцијом коју видимо на слици. Пошто је реч о реконструкцији из једног погледа, опште је познато из компјутерске визије да овакво добијено решење није гарантовано тачно. Овај проблем је нарочито видљив када се ради о реконструкцији секвенци слика, али са друге стране VIBE то користи као предност – зато што користи дискриминатор покрета  $D_M$  чији је задатак да оцени да ли је добијена секвенца реконструкција реалистична или не.

Конкретно, излаз описаног генератора  $\hat{\Theta}$  се прослеђује на улаз дискриминатора који почиње вишеслојним GRU блоком, садржи енгл. Self attention блок (који повећава утицај доминантних фрејмова на крајњу предикцију) (Bahdanau D. et al. 2014), а завршава се линеарним слојем који враћа вероватноћу да предвиђени манифолд  $\hat{\Theta}$  припада групи природних покрета човека. Према томе, четврта компонента у функцији

циља је  $L_{adv} = E_{\Theta \sim P_R} \left[ \left( D_M(\Theta) - 1 \right)^2 \right] + E_{\Theta \sim P_G} \left[ D_M(\hat{\Theta})^2 \right]$ . Овај израз врши проверу да

ли добијена секвенца реконструкција  $P_G$  одговара реалистичном покрету  $P_R$  или не (поређењем са претходно поменутом AMASS базом покрета). Архитектура дискриминатора је слична архитектури генератора, садржи два FC слоја са 1024 неурона и енгл. tanh активационом функцијом, док финални слој предвиђа један број – вероватноћу да је генерисана секвенца поза природна или неприродна. Пошто VIBE као улаз захтева низ фрејмова на којима се прати одређена особа (чија се поза треба

реконструисати), у овом раду је коришћен алгоритам за детектовање и праћење људи базиран на примени Mask R-CNN архитектуре (He K. et al. 2018). Илустрација резултата рада алгоритма приказана је на следећој слици.

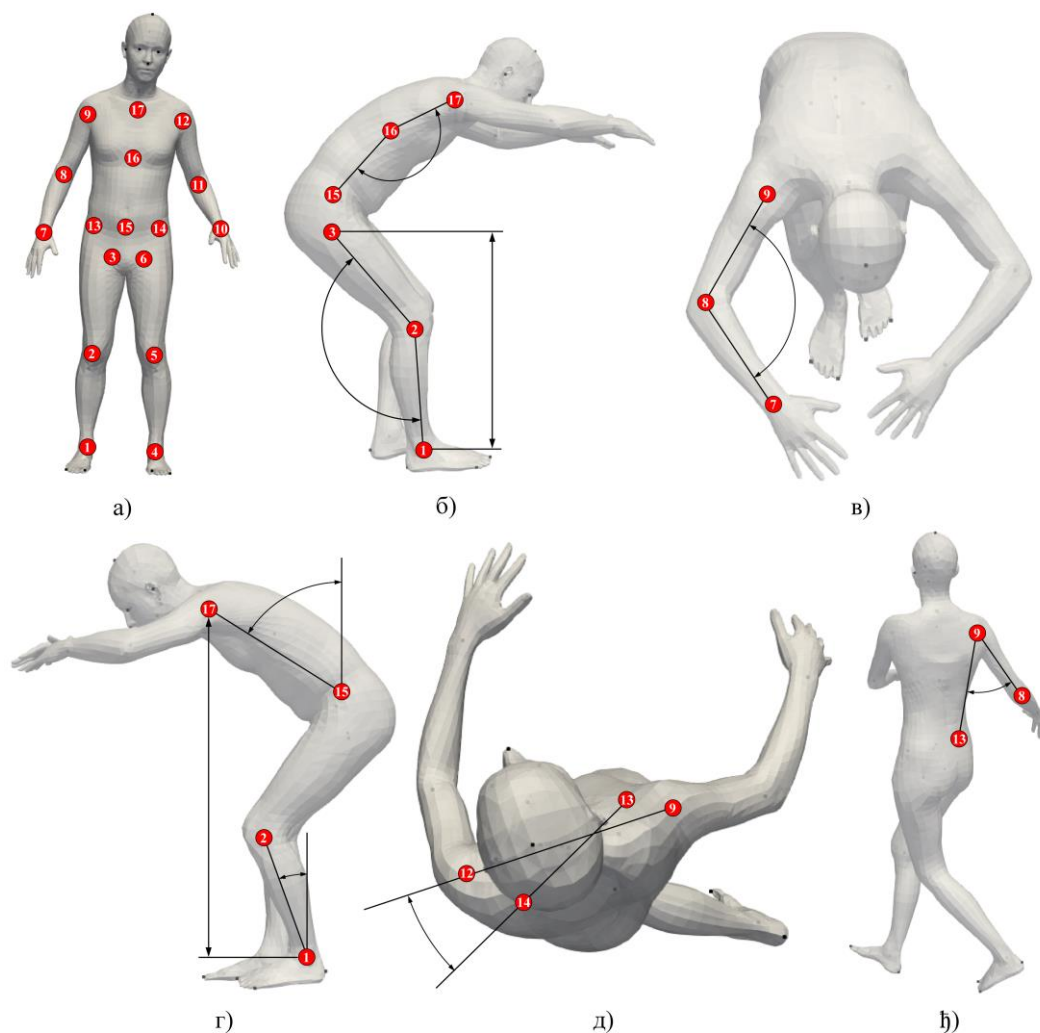


*Слика 6.10 Илустративни приказ резултата (лево) за улазну слику (десно).*

### 6.3.4 Ергономски параметри положаја тела радника

На слици 6.11 а) приказано је 17 кључних тачки које ће бити праћене у циљу одређивања ергономичности покрета. Мерени параметри се могу поделити у три групе:

- Параметри ногу: Угао десног  $\psi_L(\sphericalangle 1,2,3)$  и левог  $\psi_D(\sphericalangle 4,5,6)$  колена; углови потколенице и вертикалне осе  $\xi_L(\sphericalangle 1,2,Z)$  и  $\xi_D(\sphericalangle 3,4,Z)$ .
- Параметри кичме: Угао кичме  $\phi(\sphericalangle 15,16,17)$ , угао кичме са вертикалном осом  $\varphi(\sphericalangle 17,15,Z)$ , растојања по вертикалној оси између тачки 1 и 3  $\tau|1,3|_Z$ , односно растојање по вертикалној оси између тачки 1 и 17  $\nu|1,17|_Z$ , и угао торзије између раменог дела и кукова  $\omega(\sphericalangle \overline{13,14}, \overline{12,9})$ .
- Параметри руку: Угао левог  $\chi_L(\sphericalangle 10,11,12)$  и десног лакта  $\chi_D(\sphericalangle 7,8,9)$  и угао десне  $\varepsilon_D(\sphericalangle 13,9,8)$  и леве  $\varepsilon_L(\sphericalangle 14,12,11)$  надлактице са трупом човека.

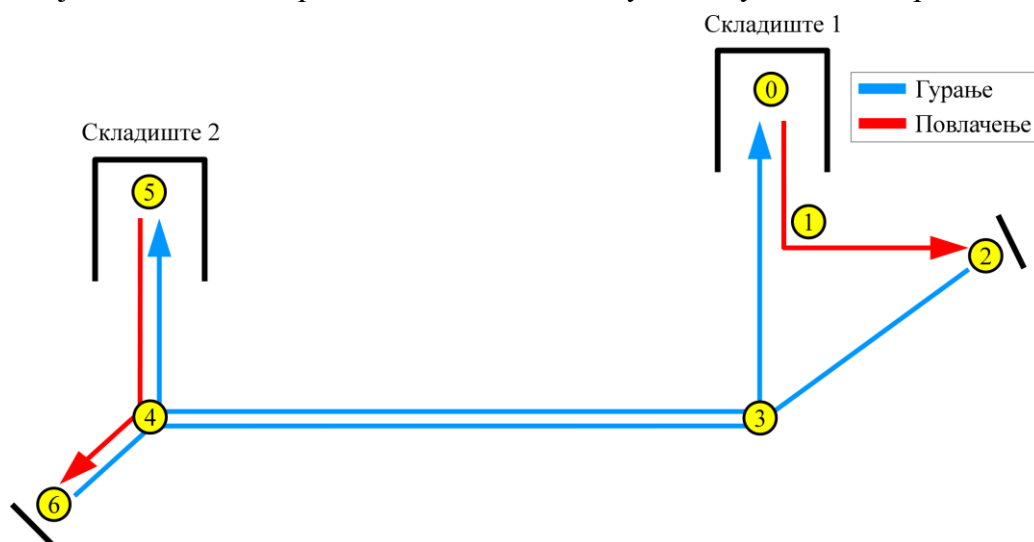


Слика 6.11 Параметри положаја људског тела који се посматрају као ергономски индикатори.

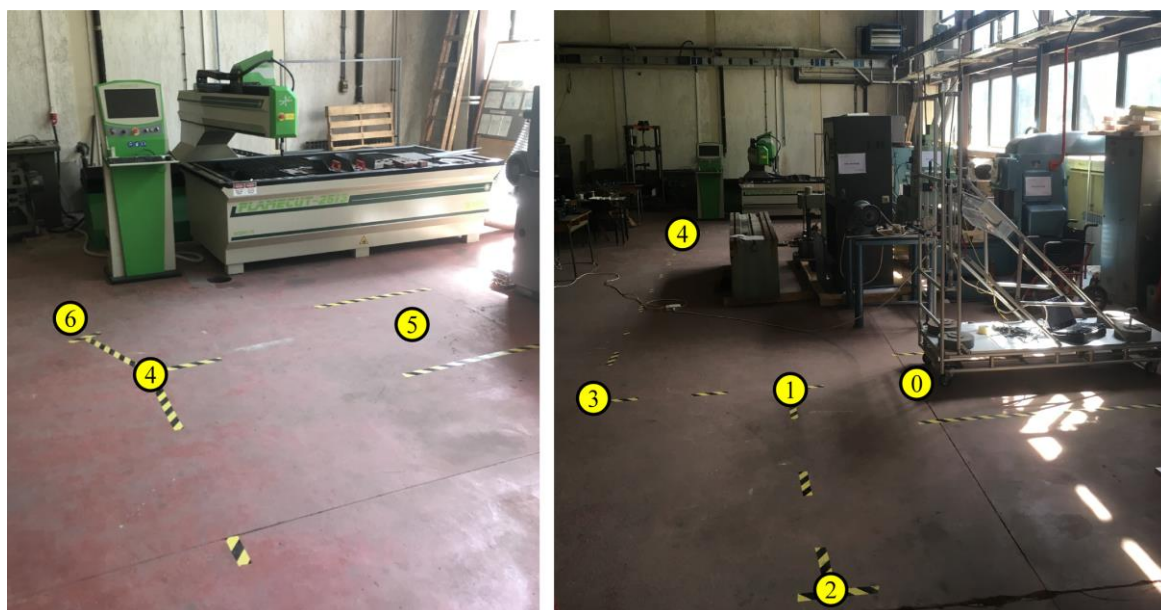
## 6.4. Добијени резултати

### 6.4.1 Евалуација у лабораторијским условима

Експеримент је замишљен у циљу евалуације предложеног решења у приближно-реалним индустријским условима (које испуњава лабораторија на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу). За те потребе, испројектована је путања укупне дужине ~20 метара, приказана на слици 6.12 и 6.13. Радни задатак укључује наизменично гурање и повлачење колица са циљем транспортовања терета између два простора за складиштење материјала. Путања од складишта 1 до складишта 2 је описана тачкама 0-1-2-3-4-5, а путања од складишта 2 до складишта 1 тачкама 5-4-6-4-3-0, при чему су на слици 6.12 делови путање где радник гура колица обележени плавом бојом, а делови где радник повлачи колица уназад су означени црвеном бојом.



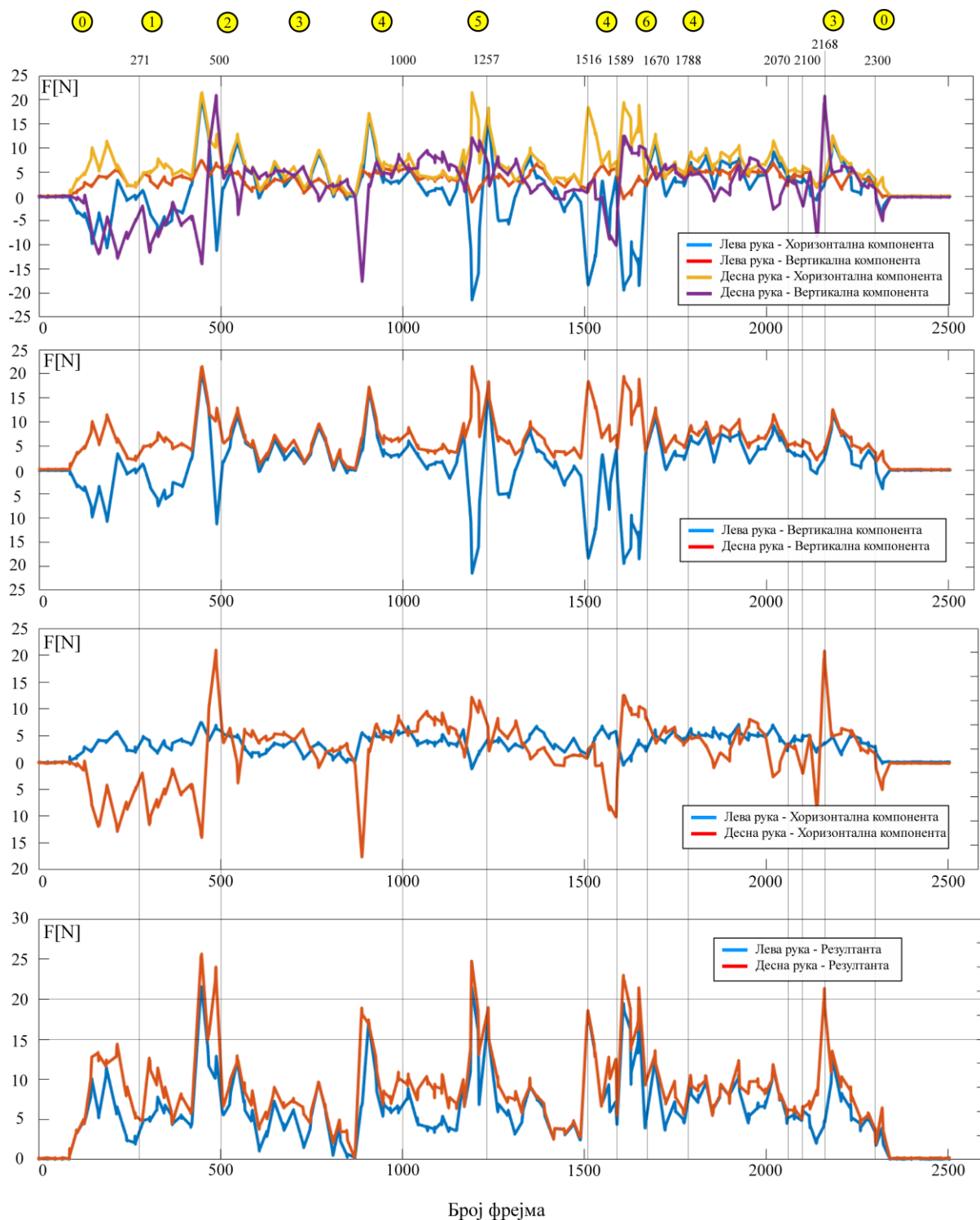
Слика 6.12 Скица путање која укључује активности гурања и повлачења колица.



Слика 6.13 Изглед радног простора са путањама назначеним жутиим тракама.

### Мерење на првом оператеру

Измерене вредности на сензорима сила су приказане на дијаграмима на слици 6.14. Први испитаник је висок 185 cm; конституција се може видети на слици 6.15. Висина ручке је подешена да буде 115 cm.



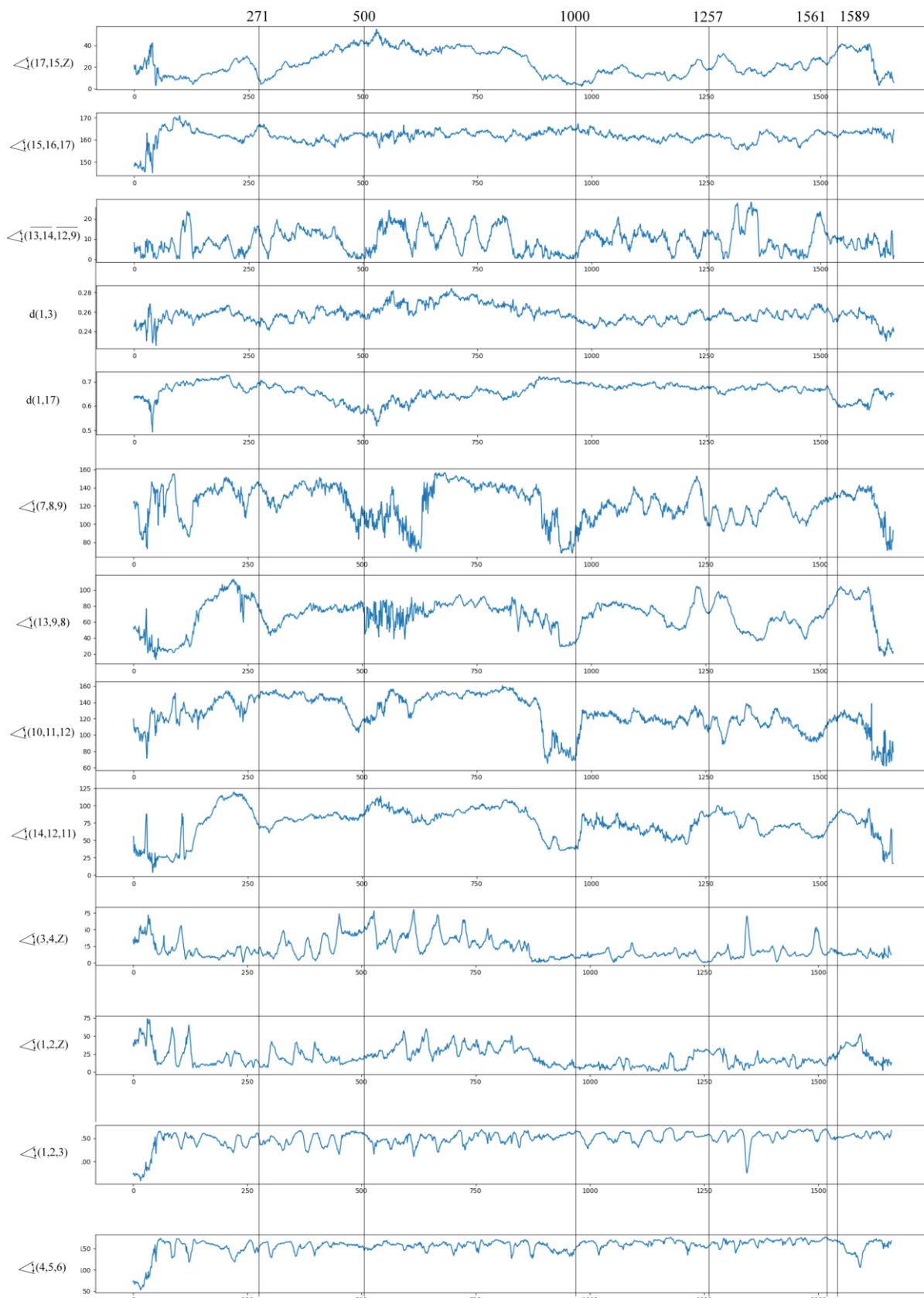
Слика 6.14 Измерене вредности силе на сва четири сензора.



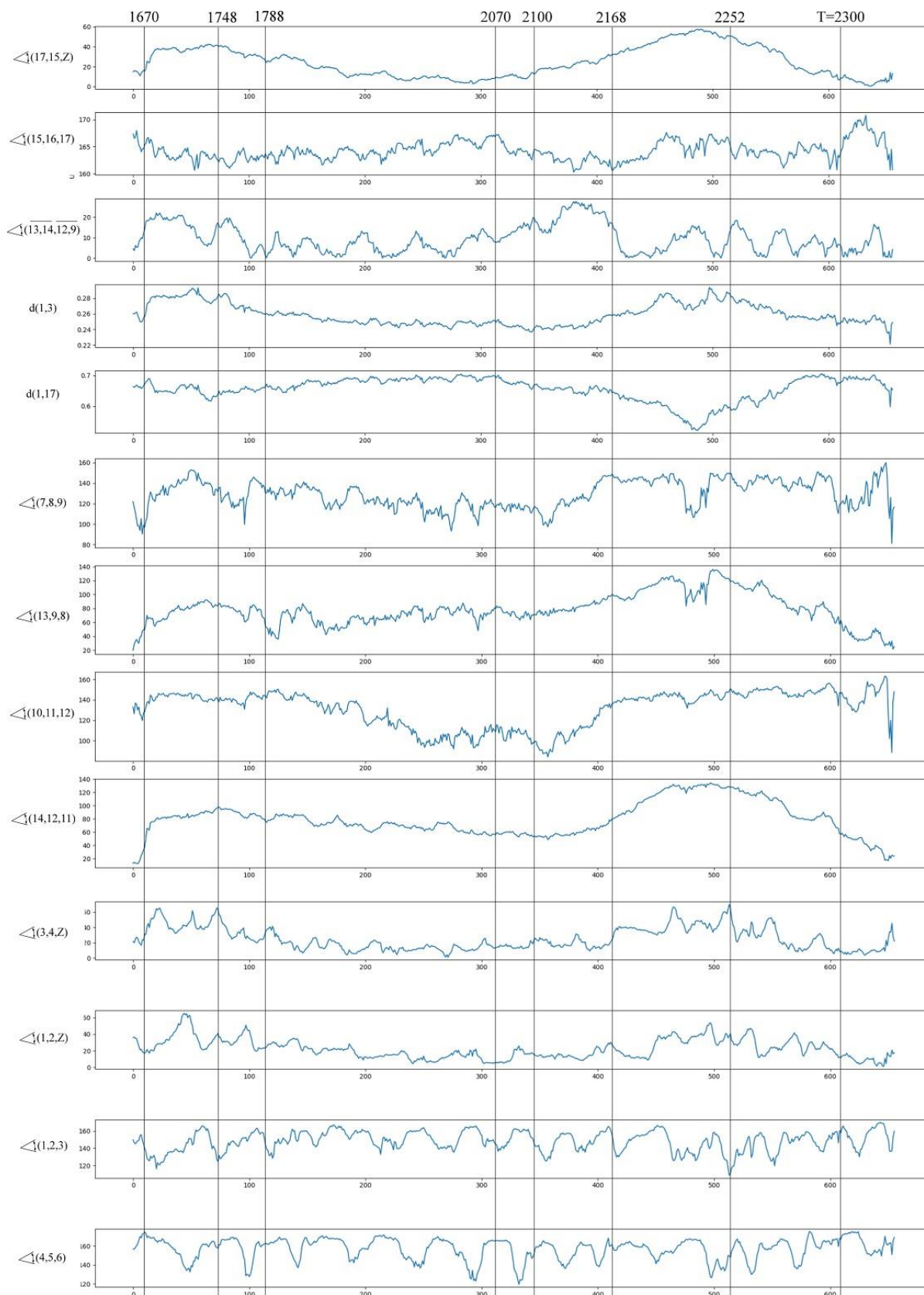


**Слика 6.15** Приказ положаја тела у карактеристичним моментима (T).

На слици 6.15 су наизменично приказане реалне-улазне слике и добијене реконструкције-процене положаја тела. У прва три реда су приказане реконструисани положаји тела из два погледа – како би се олакшала процена ергономског ризика. На сликама 6.16 и 6.17 су приказани дијаграми параметара положаја тела (погледати слику 6.11) који су праћени током целог процеса транспорта терета. Због техничких разлога, параметри положаја тела су приказани из два дела (тј. на две слике) – док су у наставку параметри за другог оператора приказани на једној слици.



Слика 6.16 Параметри положаја тела у фази гурања колица од складишта 1 до складишта 2 (путања 0-1-2-3-4-5-6).

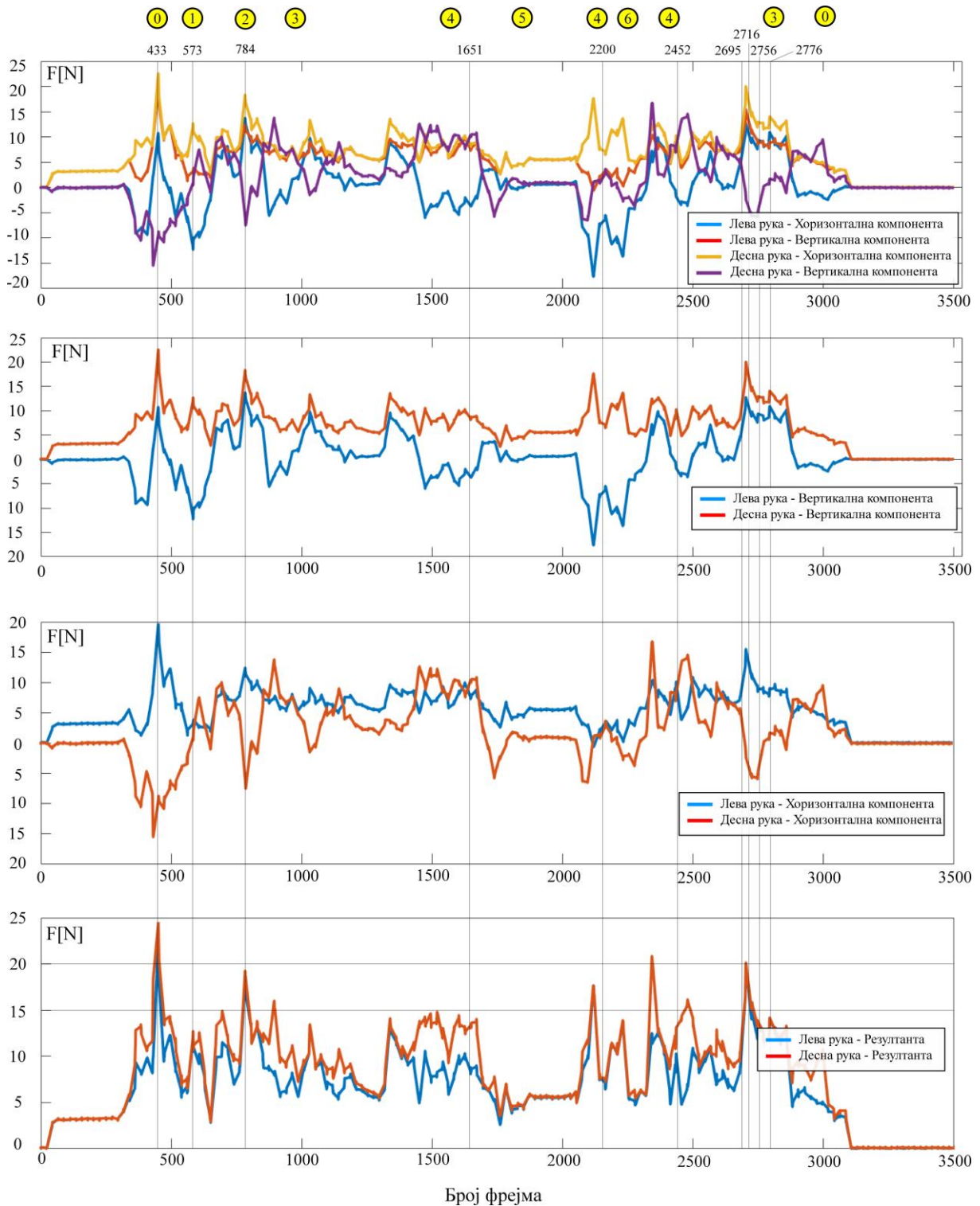


Слика 6.17 Параметри положаја тела у фази гурања колица од складишта 1 до складишта 2 (путања 4-3-0).



**Мерење на другом испитанику**

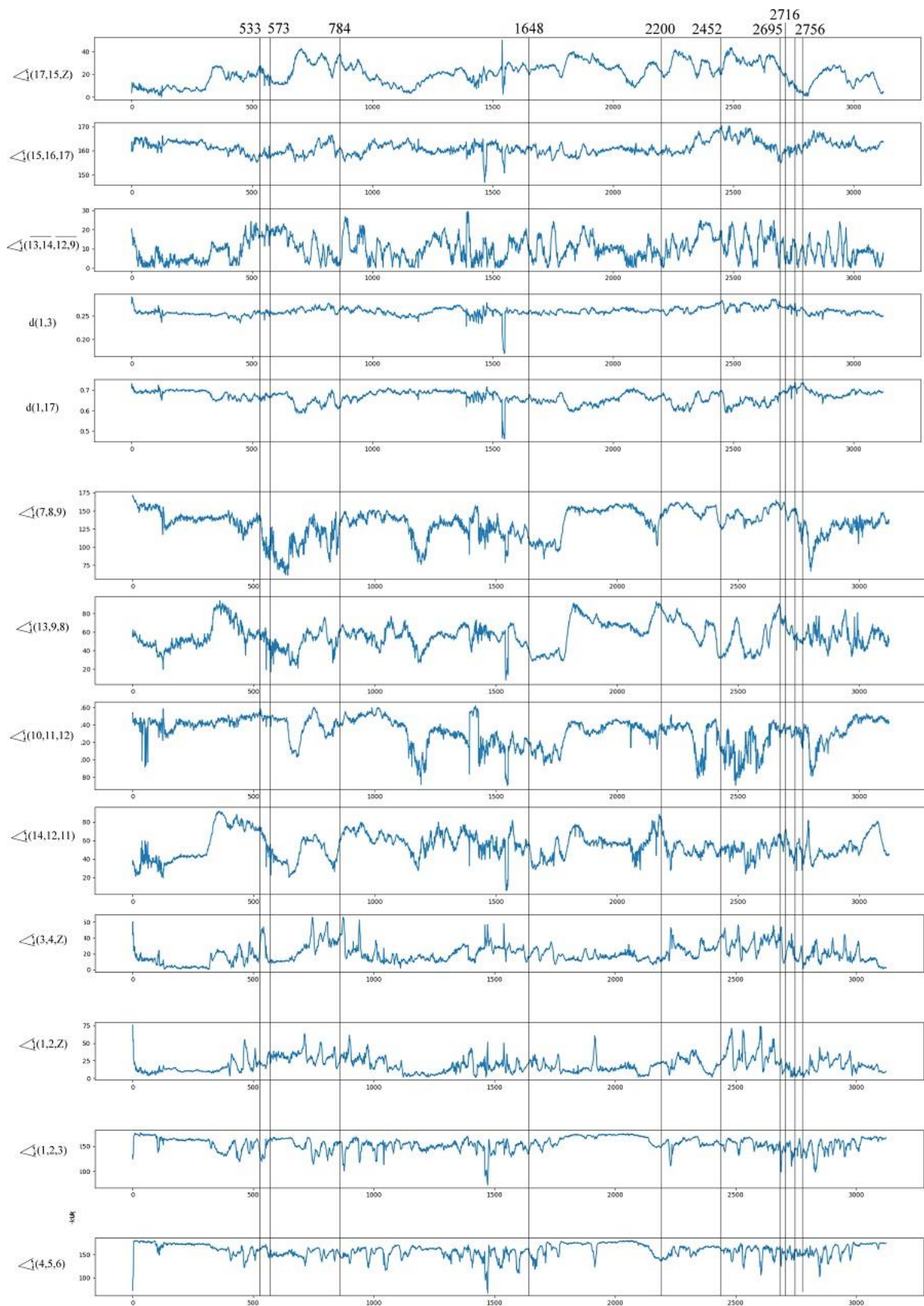
У наставку ове секције су резултати за другог оператера, висине ~200 см.



*Слика 6.18 Измерене вредности силе на сва четири сензора.*



Слика 6.19 Приказ положаја тела у карактеристичним моментима (Т).

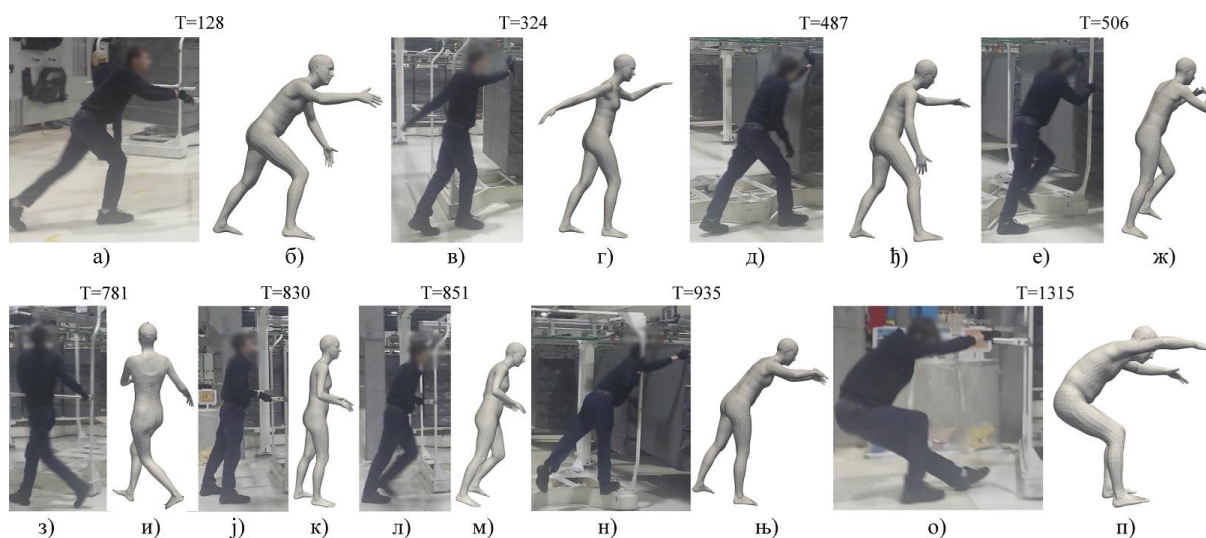


*Слика 6.20 Вредности параметара положаја тела током транспорта терета колицима.*

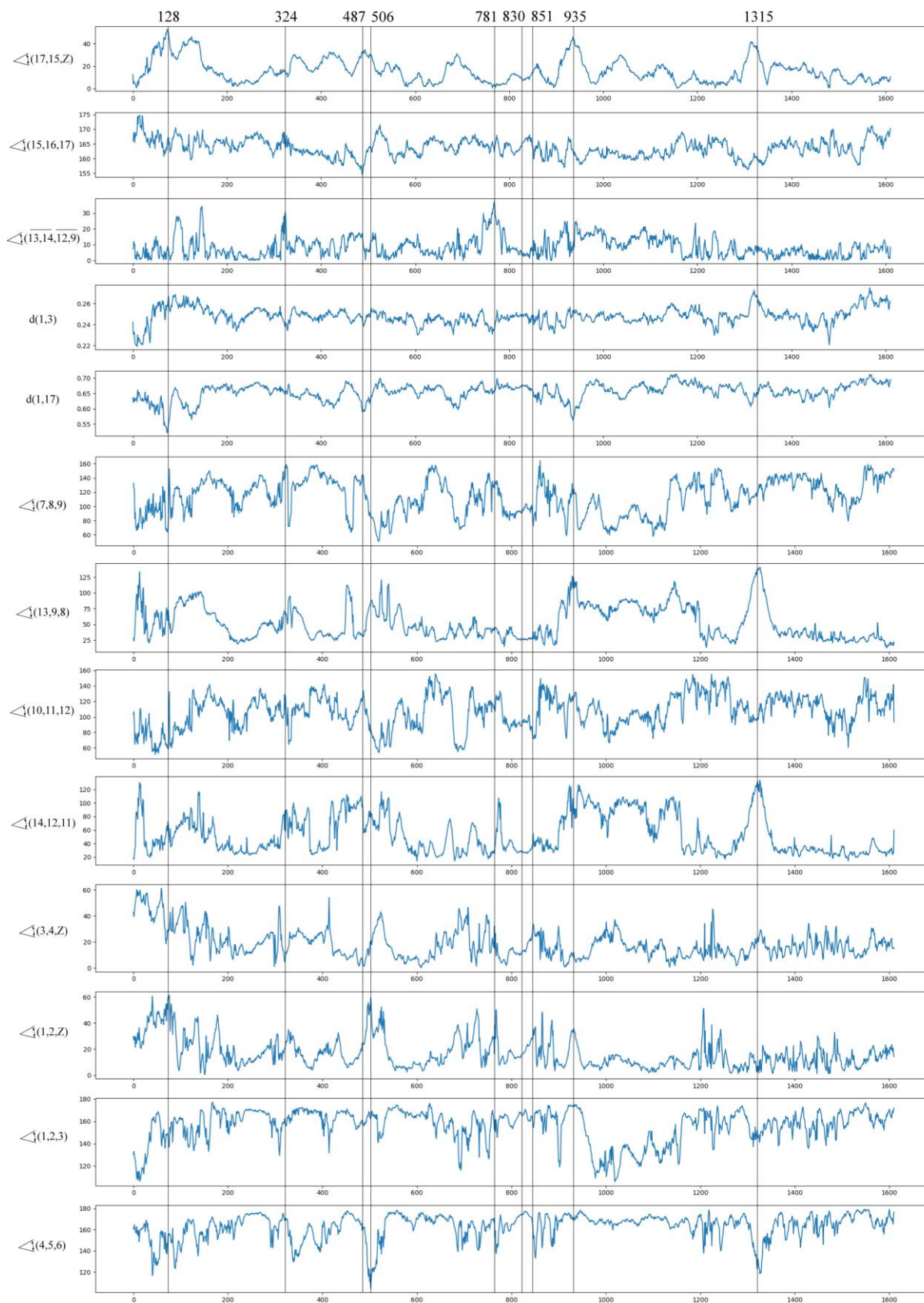


### Евалуација на снимку направљеном у реалним-индустријским условима

У овом случају, анализиран је снимак од 1610 фрејмова снимљених у реалном индустријском окружењу где радник врши транспорт терета на колицима. Пошто колица на себи немају инсталиране мераче сила, циљ је проверити да ли се небезбедни поступци могу детектовати анализирајући само видео записе. Додатно, циљ је анализирати комплетан процес транспорта терета – који не укључује само моменте у којима радник делује силом на колица, већ и моменте у којима утовара-истовара терет. На слици 6.21 приказани су дијаграми ергономских параметара измерених на реконструисаним силуетама радника. На слици 6.20 приказани су фрејмови који одговарају превојним тачкама са слике 6.21 (изузев слика под ј-м, које одговарају уобичајеним радњама).



**Слика 6.21** Приказ положаја тела у детектованим екстремним тачкама на дијаграму са слике 6.22.



Слика 6.22 Вредности параметра положаја тела током транспорта терета колицима.

## 6.5. Дискусија резултата

### Евалуација у лабораторијским условима

На основу препорука из литературе, усвојено је да су вредности измерених сила унутар или изнад опсега 15-20 N указује да је радник у неергономском положају или да је преоптерећен (Snook S.H. et al. 1991). За првог испитаника, дијаграми са слике 6.14 показују да су моменти 2, 4, 5, 6 и 3 (скица путање са карактеристичним моментима је дата на слици 6.12) моменти када испитаник делује максималном силом на колица. Наведени моменти-екстремне вредности одговарају моментима када испитаник започиње кретање – дакле, у питању су почетне силе. Што се тиче вредности сила одржавања кретања колица, њихове вредности су 2-3 пута мање од почетне силе. Пошто мерна апаратура омогућава мерење сила којом испитаник делује левом и десном руком, може се приметити да у моментима када је потребно заокренути-променити правац кретања колица (период 1-3, 4-5, крај периода 4-3) резултујућа сила десне руке има прилично већу вредност. Ако се погледају варијације вредности на слици 6.14 на врху, примећује се да моментима промене правца одговарају значајне варијације интензитета сила по вертикалном и хоризонталном правцу. На основу тога се може закључити да у тим моментима мишићно-коштани систем човека трпи оптерећење у виду торзије – које може узроковати повреде. Узимајући у обзир измерене вредности сила, анализа положаја тела оператера у карактеристичним моментима гурања колица се може извести на основу слике 6.15. У моментима који одговарају екстремним вредностима сила на слици 6.14 положај оператера је правилан-ергономски. Покретање колица ( $T=500$ ,  $T=1000$ ,  $T=1778$ ,  $T=2100-2252$  слика 6.15) се углавном врши у усправном положају, при чему се неергономским положајем може сматрати моменат  $T=2168$ . Са друге стране, акције које оператер треба да предузме у моментима промене правца су доста сложеније ( $T=271$ ,  $T=1257$ ,  $T=1748$ ,  $T=2070$  слика 6.15) и положаји тела су доста неприроднији. Заједно са дијаграмима са слике 6.14, долази се до закључка да тело човека трпи озбиљан напор у датим моментима, конкретно торзију. Као што се може видети са слике 6.15 и слике 6.16, вредности посматраних параметара који описују положај тела човека су у корелацији са неергономским положајима тела човека. Што се тиче оцене релевантности појединих параметара, истраживање је показало да су параметри руку најмање релевантни – и да се генерално могу занемарити (ако се подразумева да је оператер увек у контакту са колицима која гура). Са друге стране, параметри који описују положај кичменог стуба показали су се као најрелевантнији за нумеричко детектовање неергономских момената – конкретно, могу се издвојити периоди када је кичма изложена превеликој торзији (у овој студији, то је угао  $\omega$  већи од 20 степени). Последња четири параметра, који се односе на углове ногу (колена и потколенице), појединачно не указују на небезбедне поступке. Ако се посматра моменат  $T=2169-2252$  (на слици 6.15), неергономски положај се може детектовати посматрањем разлике углава леве и десне ноге. Међутим, са слике 6.17 се види да параметри  $d(1,3)$  и  $d(1,17)$  много јасније указују на небезбедне поступке гурања (превојне тачке које одговарају моментима  $T=500$ ,  $T=1589$ , и посебно у периоду  $T=2168-2252$ ).

Анализом резултата за другог испитаника може се доћи до сличних закључака везано за релевантност разматраних параметара положаја тела који се могу добити машинском визијом. Што се тиче дијаграма сила приказаног на слици 6.18, екстремне вредности резултанти се разликују – као и моменти у којима се јављају у односу на првог оператера. Максимална вредност силе измерена је у моменту 0, док су силе измерене у осталим моментима где се започиње гурање-повлачење мање него код првог испитаника (2, 4, 5, 6 и 3). Може се приметити да и испитаник бр. 2 има тенденцију да

јачом силом делује десном руком, што може имати везе са тим да ли је испитаник деснорук или леворук. Иако резултујуће вредности имају мање интензитете, може се приметити на основу првог дијаграма на слици 6.18 да постоји приметна варијација интензитета вертикалне и хоризонталне компоненте, као и вредности компоненти измерених на левој и десној ручки. На основу увида и анализе видео снимка оператера може се приметити да други оператер има тенденцију да колица помери „заокретањем“ односно моментом више него праволинијским гурањем. Ово визуелно запажање се може потврдити и на сигналима резултујућих сила на слици 6.19, где се јасно види да је разлика сила на левој и десној ручки знатно већа него код првог испитаника. Разлика је посебно уочљива у деловима путање где се врши скретање, а то су моменти 2-3, 4-5 и 4-3. Како је други испитаник заокретања вршио више моментом – а мање гурањем и повлачењем колица, варијације параметара који указују на висину кукова и рамена немају значајних превојних тачки. То значи да је радни задатак извршен у претежно усправном положају. Са друге стране, параметар којим се мери торзија кичменог стуба има константно веће вредности и много већи број превојних тачки (при чему су критични моменти  $T=573$ ,  $T=1648$ ,  $T=2756$  на слици 6.19).

### **Евалуација на снимку направљеном у индустријским условима**

У моменту  $T=128$  угао између кичме и вертикалне осе је максималан, а самим тим и растојање раменог дела од подлоге; поред тога, угао између вертикалне осе и подколенице је такође велики – што указује на неприродан положај тела. Са слике 6.21 се још види да радник колица гура једном руком, што се не манифестује битно на разматране углове (и сугерише да треба посматрати висину шака у односу на подлогу). У моменту  $T=324$  забележена је превојна тачка торзије кичменог стуба – што је потврђено и сликом 6.21-в-г, на којој се види да радник истовара терет (овај небезбедни моменат се не би детектовао мерачима силе јер радник у том моменту није у контакту са ручкама колица). У моменту  $T=324$  забележена је превојна тачка угла кичме са вертикалном осом и угла превоја-савијања кичме, као и висине раменог дела у односу на подлогу. Приметне су и превојне тачке на дијаграмима углова руку – али се са слике види да алгоритам генерално има проблем да са високом прецизношћу одреди положај руку у тродимензионалном простору уколико поглед није оптималан (на сликама 6.21-а и 6.21-д лева рука се готово и не види, па не чуди смањена прецизност реконструкције). Даље, у моменту  $T=506$  примећују се превојне тачке углова леве потколенице и колена, док су углови десне ноге у том моменту далеко од превојних тачки – али бележе раст исто као и углови кичме. На слици 6.4.10-е види се неуобичајена акција радника – који се пење на металне носаче колица и једном руком гура терет који је потребно истоварити. У моменту  $T=781$  забележена је максимална вредност угла торзије кичме – са слике 6.21-з видимо да радник врши неправилно заокретање колица, у веома неприродном положају. Као што је напоменуто, моменти  $T=830$  и  $T=850$  одговарају ергономски-правилним активностима, што је потврђено и сликама 6.21-ј и 6.21-л. Момент  $T=935$  је сличан моменту  $T=506$ , кичма и лева нога имају необично велики угао са вертикалном осом – а радник се поново пење на конструкцију колица и гура-истовара/утовара терет једном руком. На крају, момент  $T=1315$  је веома интересантан јер осликава веома небезбедан поступак – можемо приметити да су превојне тачке приметне на већини дијаграма, а да радник крајње неправилно врши повлачење терета уназад (што може бити и последица преоптерећености колица теретом који радник није у стању да помери ергономским покретима). На слици 6.21-о-п, и генерално на целом примеру, може се закључити да алгоритам не може идеално прецизно да реконструише положај тела (на пример, на слици 6.21-п се види да лева нога, која се не види оптимално, није прецизно реконструисана) – ипак, добијена реконструкција и трендови

промена мерених параметара су се показали као довољним за детекцију неергономских покрета.

## **6.6. Закључци шестог поглавља и смернице за даља истраживања**

Правовремена детекција небезбедних поступака представља кључ за превенцију последица неправилног извршавања радних задатака који укључују транспорт материјала на ручним колицима – а то су коштано-мишићне повреде радника. Тренутна пракса и стандарди базирани су на употреби табела, које на основу пола оператера, дистанце коју треба прећи и сличних параметара дефинишу правце за организацију радног места (обично максималну дозвољену тежину терета). У овом поглављу разматрана је могућност примене технологија И4.0 у циљу детекције небезбедних поступака при гурању терета на колицима. Иако је у питању једноставан радни задатак, континуално надгледање и анализа ергономичности поступака радника није тривијалан проблем за инжењере безбедности. Разматрано решење, базирано на примени сензора силе и камера којима се може приступити са удаљености, показало је низ потенцијалних унапређења у односу на постојећу литературу. Конкретно, нове технологије имају велики потенцијал да детектују карактеристичне небезбедне акције-поступке, користећи алгоритме који су способни да реконструишу положај људског тела на основу дводимензионалних слика. Резултати добијени у овом раду базирани су на праћењу и анализи параметара положаја појединих делова тела, при чему су се параметри кичме показали као најрелевантнији. Предложени систем показао се као поуздан за детектовање и анализу небезбедних поступака када радник на колицима делује силом већом од вредности предвиђене стандардима. Међутим, резултати студије су показали да моменти, када вредност силе гурања прелазе граничне вредности, нису једини потенцијални моменти повећаног ризика од повреда. Конкретно, анализа вредности сила гурања и параметара положаја тела указала је да у моментима када радник покушава да скрене колицима у страну долази до увијања-торзије трупа човека, и да је положај тела у таквим моментима неправилан. Међутим, прецизно мерење оптерећења и замора које мишићи трпе могуће је извести помоћу енгл. EMG уређаја који нису коришћени у овој студији. Из тог разлога, потенцијални правац за будућа истраживања јесте развој решења које би укључило анализу облика тела (не само параметара добијених на основу кључних тачки појединих делова тела) и паралелно прикупљених EMG сигнала и сила гурања. Овакви системи би допринели дубљој анализи акција које радници предузимају и њихове корелације са замором и мишићно-коштаним повредама.



## 7. Закључна разматрања и смернице за будућа истраживања

Прелиминарна истраживања и доступна научно-стручна литература везана за имплементацију технолошких пилаара И4.0 у индустријским системима показала су постојање значајних варијација, како у обиму и сложености тако и у домену и фокусу свога рада. Основни закључак, који се намеће, јесте да је тематска област веома широка, па је из тог разлога још увек у фази развоја; и да се тек могу очекивати масовнији примери имплементације научних проналазака у пракси. Фокус рада на овој дисертацији је стављен на три техничка пилаара Lean индустријских система, и то на: Безбедност на раду, Контрола квалитета и Логистика. Са друге, стране као технолошки пилаари И4.0 одабрани су Вештачка интелигенција (енгл. AI – Artificial Intelligence) са акцентом на машинску визију (енгл. Machine Vision), затим рачунарства у облаку (Cloud) и Интернет ствари (енгл. IoT – Internet of Things). Теоретски, комбиновањем 9 пилаара И4.0 и 10 пилаара Lean-а отвара се огроман број конкретних индустријских проблема-примена које тек треба истражити, које је тешко покрити у оквиру једне студије. Из тог разлога, у поглављима 3, 4, 5 и 6 су анализирани практични проблеми који могу послужити као адекватне модел зоне. На овај начин је испоштован један од основних принципа Lean индустријских система, принцип ”модел зоне” који намеће ограничени приступ у процесу унапређења одређеног пилаара кроз фокусирање на конкретан проблем и његово решавање у оквиру једног сегмента пословања или производње. У том смислу, у оквиру ове дисертације су идентификовани конкретни проблеми у посматраним пилаарима Lean индустријских система који су анализирани и решени применом метода и алата И4.0. У наставку, биће дата закључна разматрања и будући правци развоја и истраживања за три разматрана пилаара.



*Слика 7.1 Паметни градови и паметне фабрике – Индустрија 4.0 (слика преузета са сајта <https://www.nvidia.com>).*

## Безбедност на раду и ергономија радног места

Област безбедности и здравља на раду се врло често посматра као најважнији пилар Lean индустријских система, а разлог лежи у његовој хуманој и социјалној природи. Дакле, ни један од пословних циљева и постављених индикатора перформанси Lean индустријских система не може имати предност у односу на безбедност и здравље запослених радника. У данашње време, тренд аутоматизације и смањења физичког рада и присуства човека у производњи за очекивану последицу има и тренд смањења негативних утицаја радног места на човека (у смислу елиминације ризика по његово здравље и безбедност), као и потребе за прилагођавање радног места физиолошким могућностима и ограничењима радника. И поред тог тренда, јасно је да ће директно учешће човека у производним радним активностима и даље остати врло значајно и неизбежно – а да ће радник бити центар И4.0. Имајући у виду наведене чињенице, намеће се закључак да технолошки пилари И4.0 у области БЗР могу бити усмерени у једном од два суштинска правца. Први правац је пуна аутоматизација и роботизација што даље води елиминасању потребе за директним људским радом у одређеним деловима производних процеса (и у комплетом производном процесу). Други правац полази од неизбежности и неопходности учешћа човека у производним радним активностима и усмерен је или ка олакшавању рада и подршци раднику на радном месту (на пример примена колаборативне роботике) или ка имплементацији напредних система за препознавање опасних ситуација и упозоравање радника (односно активирање напредних система заштите). Наведени развојни правци представљају основу БЗР 4.0, односно система безбедности и здравља на раду у оквиру концепта Индустрије 4.0.

Према Хајнриховој пирамиди, проактивна идентификација небезбедних услова (НУ) и небезбедних поступака (НП) имају највећи утицај на укупан ниво безбедности на раду у једној компанији. Иако постоје препоруке предложене у оквиру регулаторних стандарда, управљање безбедношћу на радном месту на традиционалан начин показало се као напоран и сложен процес. Будући да НУ и НП могу варирати од физичке до дигиталне форме, пракса показује све више захтева за прилагођеним и дигиталним решењима која могу помоћи у проактивној превенцији несрећа кроз дигитализовано управљање извештајима о БЗР. Овај аспект-захтев представља један од два дефинисана правца истраживања која се односе на БЗР 4.0, а који је разматран у дисертацији. При томе, у првој студији случаја подразумевано је да радници сами препознају и креирају извештаје о небезбедним условима и небезбедним поступцима. Дакле, развијени систем је имао за циљ да дигитализује и убрза управљање подацима и извештајима, али је ослобођен анализе дешавања у радном окружењу – што је предмет четврте судије случаја, где се тај проблем решава применом машинске визије. На тај начин, потврђена је прва постављена хипотеза у секцији 1.3 – да се дигитализацијом може унапредити колекција, чување и обрада извештаја о небезбедним условима и небезбедним поступцима. Поред ефикасног управљања извештајима о БЗР, благовремено уочавање небезбедних услова и поступака у радном окружењу је још један велики изазов за менаџере БЗР узимајући у обзир величину производних хала и број радника. Иако су визуелна анализа и сналажење у простору веома интуитивни задаци и одлике сваког

човека, са аспекта дитигализације и аутоматизације - тренутна технолошка достигнућа су још увек далеко од могућности просечног човека. У сваком случају, напредак на пољу разумевања и анализе слика употребом техника машинске визије подстрек су за њихову примену у бројним гранама индустрије. У складу са тим, у склопу четврте студије случаја спроведена су истраживања која се односе на примену метода машинске визије за идентификацију ергономских ризика на радним местима. Истраживања спроведена у склопу ове дисертације довела су до резултата који потврђују другу постављену хипотезу (секција 1.3) – да се употребом техника вештачке интелигенције и машинске визије могу препознати небезбедни поступци запослених чији радни задаци укључују транспорт материјала ручним колицима. У савременим Lean индустријским системима добри ергономски услови имају најдиректнији утицај на перформансе производних процеса. У том смислу, примена напредних система за аутоматизовану идентификацију ергономских ризика током мануелних радних задатака представљају веома значајни допринос – што указује на правац даљих истраживања и потребу развоја апликативних решења. У овом тренутку, та иницијатива је подржана двогодишњим пројектом Фонда за науку и представља наставак истраживања изложених у дисертацији.

### **Контрола и управљање квалитетом производа**

Контрола и управљање квалитетом производа представља свакако један од најзначајнијих аспеката интегрисаног система управљања индустријским процесима у оквиру Lean индустријских система. Континуирано поштрвавање захтева за унапређењем квалитета компоненти и коначног производа, смањење шкарта и обезбеђење ригорозне контроле квалитета у условима масовне производње имплицира неопходност коришћења напредних технологија које ће убрзати процес контроле квалитета, смањити удео људског рада и ефекат субјективности и обезбедити одговарајуће системе за прикупљање, обраду и чување података у циљу омогућавања потпуне следљивости кључних информација. Имајући у виду комплексне и обимне захтеве који се постављају пред функцију контроле и управљања квалитетом производа намеће се потреба за имплементацију напредних метода и алата И4.0 у циљу остваривања постављених циљева. Сагледавајући варијације метода и алата И4.0 са једне стране и разноврсност и комплексност захтева, може се закључити да постоји оправданост и потреба за примену практично свих технолошких пилаара И4.0 у овом сегменту Lean индустријских система, почевши од оних који утичу на унапређење самих производних процеса и смањивања шкарта (аутономни роботи, адитивна производња, виртуелна и проширена стварност), преко оних којима се омогућује прикупљање и обрада података и информација (IoT, cloud, AI, Big Data), до оних који омогућавају напредну интеграцију функције Контроле и управљања квалитетом у оквиру комплексних индустријских процеса.

У раду на овој тези посебна пажња је посвећена анализи могућности и ограничења за примену метода машинске визије за димензионалну контролу производа у условима серијске производње. Као индустријска студија случаја, за потребе истраживања у оквиру овог дела тезе, разматран је проблем раванске димензионе

контроле производа комплексне геометрије израђених од еластомерних материјала. Овај случај је изабран због низа додатних специфичности, попут деформабилности гуме, које усложњавају читав процес димензионе контроле. Управо због тога, резултати добијени у дисертацији допринели су развоју општег решења, погодног за димензиону анализу разних раванских производа. На тај начин, потврђена је трећа хипотеза – да се инспекција екструдованих гумених профила може дигитализовати и унапредити применом техника машинске визије и дигиталне обраде слике. Даља истраживања на овом пољу биће усмерена на унапређење система и развој софтверске апликације, која ће омогућити архивирање и анализу извештаја контроле квалитета. У овом тренутку, та иницијатива је подржана пројектом Фонда за иновациону делатност и представља наставак истраживања изложених у дисертацији.

### **Логистички аспекти праћења токова материјала и производа**

Логистика представља својеврсни крвоток савремених индустријских система и њене перформансе најдиректније утичу на укупне перформансе предузећа. Сложени захтеви који се постављају пред функцију логистике се односе на остваривање производње у складу са планираним тактом (енгл. Takt Time), тачно на време (енгл. Just in Time) и са минимално могућим залихама и према реалној тражњи купаца (енгл. Pull production). При томе, треба имати у виду да се, у Lean индустријским системима, нежељени ниво залиха (сировина, полупроизвода или готових производа) идентификује као губитак. Технолошки пилари и припадајући алати и методе Индустрије 4.0 имају, потенцијално, веома важно место у будућем развоју логистичких процеса у смеру задовољења парадигме Логистике 4.0.

У оквиру ове тезе, акценат је био на анализи могућности имплементације конкретних алата (машинска визија и облак технологије) за унапређење процеса праћења и управљања токовима материјала-полупроизвода у оквиру производног погона и посебних зона одређених за његово привремено лагеревање (FIFO линије) – чиме је потврђена четврта хипотеза постављена у секцији 1.3. У литератури су такође доступни радови на тему примене техника компјутерске визије за детектовање и праћење предмета и процеса на градилиштима, производње делова у аутомобилској индустрији, контролу робота који аутоматски пакују или сортирају робу у складиштима, као и употребу машинске визије за потпуну замену људске снаге у трговинским ланцима (нпр. комерцијално решење Amazon Go). Истраживања у овој области су још увек у почетним фазама, а комерцијалано доступна решења су далеко од опште прихваћених и стандардизованих, имајући у виду њихову цену и комплексност, што значи да постоји значајан простор за даље истраживање и развој концепта могућих и изводљивих решења како на научном тако и на стручно апликативном нивоу.

## Литература

1. Alguliyev R., Imamverdiyev Y., Sukhostat L. (2018) Cyber-physical systems and their security issues. *Computers in Industry*, Vol. 100, pp. 212-223, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.017>.
2. Anchini R., Di Leo G., Liguori C., Paolillo A. (2009) Metrological Characterization of a Vision-Based Measurement System for the Online Inspection of Automotive Rubber Profile. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 58, No. 1, pp. 4-13. doi: 10.1109/TIM.2008.2004979.
3. Aponte-Luis J., Gómez-Galán J.A., Gómez-Bravo F., Sánchez-Raya M., Alcina-Espigado J., Teixido-Rovira P.M. (2018) An Efficient Wireless Sensor Network for Industrial Monitoring and Control. *Sensors*. Vol. 18, No. 1, pp. 182-197. doi: <https://dx.doi.org/10.3390/s18010182>.
4. Badri A., Boudreau-Trudel B., Souissi, A.S. (2018) Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern. *Safety Science*, Vol. 109, pp. 403-411. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.012>.
5. Baldissoni G., Comberti L., Bosca S., Murè S. (2019) The analysis and management of unsafe acts and unsafe conditions. Data collection and analysis. *Safety Science*, Vol. 119, pp. 240-251. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.10.006>.
6. Banijamali A., Pakanen O.-P., Kuvaja P., Oivo M. (2020) Software architectures of the convergence of cloud computing and the Internet of Things: A systematic literature review. *Information and Software Technology*, Vol. 122, No. 106271, <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2020.106271>.
7. Bauk S., Schmeink A., Colomer J. (2018) An RFID model for improving workers' safety at the seaport in transitional environment. *Transport*, Vol. 33, No. 2, pp. 353-363. doi: <https://doi.org/10.3846/16484142.2016.1233512>.
8. Bauk S., Schmeink A., Colomer J. (2018) An RFID model for improving workers' safety at the seaport in transitional environment. *Transport*, Vol. 33, No. 2, pp. 353-363. doi: <https://doi.org/10.3846/16484142.2016.1233512>.
9. Belongie S., Malik J., Puzicha J. (2002) Shape Matching and Object Recognition Using Shape Contexts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 24, No. 24, pp. 509-521.
10. Bogo F., Kanazawa A., Lassner C., Gehler P., Romero J., Black M.J. (2016) Keep it SMPL: Automatic estimation of 3D human pose and shape from a single image. In *European Conference on Computer Vision*.
11. Bragatto P., Ansaldi, S. and Agnello, P. (2015) Small enterprises and major hazards: How to develop an appropriate safety management system. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 33, pp. 232-244. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.12.016>.
12. Breckle T., Kiesel M., Kiefer J., Beisheim N. (2019) The evolving digital factory – new chances for a consistent information flow, *Procedia CIRP*, Vol. 79, pp. 251-256, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.059>.
13. Canny J. (1986) A Computational Approach To Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 8, No. 6, pp. 679-698.

14. Cho K., van Merriënboer B., Glehre D., Bahdanau D., Bougares F., Schwenk H., Bengio Y. (2014) Learning phrase representations using rnn encoder-decoder for statistical machine translation. In EMNLP.
15. Ciriello V.M., McGorry R.W., Martin S.E. (2001) Maximum acceptable horizontal and vertical forces of dynamic pushing on high and low coefficient of friction floors. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 27, pp. 1–8.
16. Damiani L., Demartini M., Guizzi G., Revetria R., Tonelli F. (2018) Augmented and virtual reality applications in industrial systems: A qualitative review towards the industry 4.0 era, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51, No. 11, pp. 624-630, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.388>.
17. de Ponte Á. M. et al. (2015) The forearm positioning changes electromyographic activity of upper limb muscles and handgrip strength in the task of pushing a load cart. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, Vol.19, No. 4, pp. 597 – 603.
18. Deb S., Carruth D.W., Sween R., Strawderman L., Garrison T.M. (2017) Efficacy of virtual reality in pedestrian safety research. *Applied Ergonomics*, Vol. 65, pp. 449-460. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.03.007>.
19. Demichela M., Piccinini N., Romano A. (2004) Risk analysis as a basis for safety management system. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 17, No. 3, pp. 179-185. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2003.11.003>.
20. DIN EN 1005-3 (2002) Safety of machinery—human physical performance—part 3: recommended force limits for machinery operation, Berlin, 2002-05.
21. Donner A., Klar N. (1996) The statistical analysis of kappa statistics in multiple samples. *Journal of Clinical Epidemiology*, Vol. 49, No. 9, pp. 1053-1058, doi: [https://doi.org/10.1016/0895-4356\(96\)00057-1](https://doi.org/10.1016/0895-4356(96)00057-1).
22. EUROSTAT (2010) Health and Safety at Work in Europe (1999-2007). A Statistical Portrait. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
23. Focardi R., Luccio F.L., Wahsheh H.A.M. (2019) Usable security for QR code. *Journal of Information Security and Applications*, Vol. 48, No. 102369.
24. Garg A., Waters T., Kapellusch J., Karwowski W. (2014) Psychophysical basis for maximum pushing and pulling forces: A review and recommendations. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 44, No. 2, pp 281-29.
25. Garibotto G., Murrieri P., Capra A., et al. (2013) White Paper on Industrial Applications of Computer Vision and Pattern Recognition. ICIAP 2013: Image Analysis and Processing – ICIAP 2013 pp. 721-730.
26. Giagloglou E., Macuzic I., Radenkovic M., Milosevic M., Jeremic B. (2015) Ergonomics of pushing and pulling: a training cart prototype, The 49th ESReDA SeminarAt: Brussels, Belgium.
27. Giagloglou E., Radenkovic M., Brankovic S., Antoniou P., Zivanovic-Macuzic I. (2017) Pushing, pulling and manoeuvring an industrial cart: a psychophysiological study. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, Vol 25, No. 2, pp. 296-304.
28. Gnani M.G., Andriulo S., Maggio G., Nardone P. (2013) “Lean occupational” safety: An application for a Near-miss Management System design. *Safety Science*, Vol. 53, pp. 96-104. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.09.012>.



29. Gnoni M.G., Lettera G. (2012) Near-miss management systems: A methodological comparison. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 25, No. 3, pp. 609-616. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.01.005>.
30. Gnoni M.G., Saleh J.H. (2017) Near-miss management systems and observability-in-depth: Handling safety incidents and accident precursors in light of safety principles. *Safety Science*, Vol. 91, pp. 154-167. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.08.012>.
31. Golabchi A., Han S., Seo J., Han S., Lee S., Al-Hussein M. (2015) An automated biomechanical simulation approach to ergonomic job analysis for workplace design. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 141, No. 8, #04015020. doi: [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000998](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000998).
32. Grote G. (2012) Safety management in different high-risk domains – All the same?. *Safety Science*, Vol. 50, No. 10, pp. 1983-1992. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.07.017>.
33. Grzywiński W., Wandycz A., Tomczak A., Jelonek T. (2016) The prevalence of self-reported musculoskeletal symptoms among loggers in Poland. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 52, pp. 12-17.
34. Guler R.A., Kokkinos I. (2019) Holopose: Holistic 3d human reconstruction in-the-wild. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, June 2019.
35. Halilaj E., Rajagopal A., Fiterau M., Hicks J.L., Hastie T.J., Delp S.L. (2018) Machine learning in human movement biomechanics: Best practices, common pitfalls, and new opportunities. *Journal of Biomechanics*, Vol. 81, pp. 1-11.
36. Harms-Ringdahl L. (2004) Relationships between accident investigations, risk analysis, and safety management. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 111, No. 1-3, pp. 13-9. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.02.003>.
37. Haslam R.A., Boocock M., Lemon P., Thorpe S. (2002) Maximum acceptable loads for pushing and pulling on floor surfaces with good and reduced resistance to slipping. *Safety Science*, Vol. 40, pp. 625–637.
38. He K., Gkioxari G., Dollar P., Girshick R. (2018) [arXiv:1703.06870v3](https://arxiv.org/abs/1703.06870v3)
39. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. (2016) Identity mappings in deep residual networks. In *European Conference on Computer Vision*.
40. Heinrich H.W. (1931) *Industrial accident prevention : a scientific approach*. New York: McGraw-Hill.
41. Heinrich H.W. (1941) *Industrial accident investigation – A Scientific Approach*, McGraw-Hill Book Company, New York and London.
42. Helander M. (2005) *A Guide to Human Factors and Ergonomics*, Second Edition. CRC Press.
43. Hollnagel E. (2014) *Safety-I and Safety-II: the past and future of safety management*. CRC Press.
44. Huang Y., Bogo F., Lassner C., Kanazawa A., Gehler P.V., Romero J., Akhter I., Black M.J. (2017) Towards accurate marker-less human shape and pose estimation over time. In *International Conference on 3Dvision*.
45. Hughes P. (2009) *Introduction to Health and Safety at Work*. Elsevier. pp. 86. ISBN 9781856176682.



46. Ibekwe T.S., Folorunsho D.O., Dahilo E.A., Gbujie I.O., Nwegbu M.M., Nwaorgu O.G. (2016) Evaluation of mobile smartphones app as a screening tool for environmental noise monitoring. *Journal of occupational and environmental hygiene*, Vol. 13, No. 2, D31-D36. doi: <https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1093134>.
47. ISO FDIS 11228-2 (2006) Ergonomics, manual handling—part 2: pushing and pulling, ISO/TC 159/SC3, ref. no. ISO/FDIS 11228-2:2006(E).
48. Jäger M., Sawatzki K., Glitsch U., Ellegast R., Jürgen Ottersbach H., Schaub K., Franz G., Luttmann A. (2007) Load on the lumbar spine of flight attendants during pushing and pulling trolleys aboard aircraft. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 37, No. 11–12, pp. 863-876.
49. Johnson C. (2002) Software tools to support incident reporting in safety-critical systems. *Safety Science*, Vol. 40, No. 9, pp. 765-780. doi: [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(01\)00085-6](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(01)00085-6).
50. Jung M., Park P. (2016) A Study on Developing of Low Cost for Safety Management System of Manufacturing Site in Developing Country Industrial Site using Arduino DEStech Transactions on Engineering and Technology Research, (mcee), pp 392-397.
51. Jung M.-C., Haight J.M., Freivalds A. (2005) Pushing and pulling carts and two-wheeled hand trucks. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 35, pp. 79–89.
52. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. (2013) Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, Heilmeyer und Sernau; Germany.
53. Kanazawa A., Black M.J., Jacobs D.W., Malik J. (2018) End-to-end recovery of human shape and pose. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
54. Karunasena C., Wickramarachchi N. (2010) Vision based cross sectional area estimator for industrial rubber profile extrusion process controlling, 2010 Fifth International Conference on Information and Automation for Sustainability, Colombo, pp. 1-6.
55. Karwowski W. (2005) *Handbook of Standards and Guidelines in Ergonomics and Human Factors*. Lawrence Erlbaum Associates.
56. Kaspersky Lab (2011) Malicious QR codes: attack methods & techniques infographic. <http://usa.kaspersky.com/about-us/press-center/press-blog/2011>.
57. Keyserling W.M., Brouwer M., Silverstein B.A. (1993) The effectiveness of a joint labor-management program in controlling awkward postures of the trunk, neck, and shoulders: Results of a field study. *International Journal of Industrial Ergonomics*. Vol. 11, No. 1, pp. 51-65.
58. Khan W.Z., Rehman M.H., Zangoti H.M., Afzal M.K., Armi N., Salah K. (2020) Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. *Computers & Electrical Engineering*, Vol. 81, No. 106522, <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106522>.
59. Kocabas M., Athanasiou N., Black M.J. (2020) VIBE: Video Inference for Human Body Pose and Shape Estimation, arXiv:1912.05656v2 [cs.CV] 27 Feb 2020.
60. Kocabas M., Karagoz S., Akbas E. (2019) Self-supervised learning of 3d human pose using multi-view geometry. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
61. Kolotouros H., Pavlakos G., Black M.J., Daniilidis K. (2019) Learning to reconstruct 3D human pose and shape via model-fitting in the loop. In *International Conference on Computer Vision*.

62. Kuijer P., Hoozemans M., Frings-Dresen M. (2007) A different approach for the ergonomic evaluation of pushing and pulling in practice. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 37, No. 11–12, pp. 855-862.
63. Lam L., Lee S.-W., Suen C.Y. (1992) Thinning Methodologies-A Comprehensive Survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 9, pp. 879.
64. Laursena B., Schibyeb B. (2002) The effect of different surfaces on biomechanical loading of shoulder and lumbar spine during pushing and pulling of two-wheeled containers. *Applied Ergonomics*, Vol. 33, pp. 167–174.
65. Lee J., Bagheri B., Kao H.A. (2015) A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, Vol. 3, pp. 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>.
66. Lee J., Nussbaum M.A., Kyung G. (2014) Effects of work experience on work methods during dynamic pushing and pulling. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 44, No. 5, pp. 647-653.
67. Legga S.J., Olsena K.B., Lairda I.S., Hasleb P. (2015) Managing Safety in Small and Medium Enterprises., *Safety Science*, Vol 71, Part C, pp. 189-196. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.11.007>.
68. Li Y., Guldenmund F.W. (2018) Safety management systems: A broad overview of the literature. *Safety Science*, Vol. 103, pp. 94-123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.11.016>.
69. Liang K., Chen X., He R., Li J., Okinda C., Han D., Shen M. (2019) Development and parameter optimization of automatic separation and identification equipment for grain tracing systems based on grain tracers with QR codes. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 162, pp. 709-718.
70. Liguori C., Paolillo A., Pietrosanto A. (2001) An on-line stereo-vision system for dimensional measurements on rubber extrusions. 11 IMEKO TC-4 Symp. - Trends in Electrical Measurement and Instrumentation - September 13-14, 2001 - Lisbon, Portugal.
71. Lin C.-L., Chen M.-S., Wei Y.-L., Wang M.-J. (2010) The evaluation of force exertions and muscle activities when operating a manual guided vehicle. *Applied Ergonomics*, Vol. 41, pp. 313–318.
72. Liu K. Bi Y.R., Liu D. (2020) Internet of Things based acquisition system of industrial intelligent bar code for smart city applications. *Computer Communications*, Vol. 150, pp. 325-333.
73. López-Robles J.R., Otegi-Olaso J.R., Porto Gómez I., Cobo M.J. (2019) 30 years of intelligence models in management and business: A bibliometric review. *International Journal of Information Management*, Vol. 48, pp. 22-38. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.01.013>.
74. Mahmood N., Ghorbani N., Troje N.F., Pons-Moll G., Black M.J. (2019) Amass: Archive of motion capture as surface shapes. In *International Conference on Computer Vision, 2019training approach*.
75. Manuele F.A. (2002) Heinrich revisited: truisms or myths. National Safety Council Press.

76. Maple C. (2003) Geometric design and space planning using the marching quares and marching cube algorithms. 2003 International Conference on Geometric Modeling and Graphics. London, UK, England. <https://dx.doi.org/10.1109/GMAG.2003.1219671>.
77. Marras W.S., Davis K.G., Granata K.P. (1998) Trunk muscle activities during asymmetric twisting motions. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, Vol. 8, pp. 247–256.
78. Mokyr J. (2001) The Industrial Revolution and the economic history of technology: Lessons from the British experience, 1760–1850☆11☆ This paper is a slightly expanded text of the Woody Thompson lecture given before the Midwest Economic Association on March 31, 2000. A more detailed and annotated version of the same ideas can be found in Joel Mokyr, “Knowledge, Technology, and Economic Growth During the Industrial Revolution.” In Bart Van Ark, Simon K. Kuipers, and Gerard Kuper, eds., *Productivity, Technology and Economic Growth*. The Hague: Kluwert Academic Press, 2000, pp. 253–292., *The Quarterly Review of Economics and Finance*, Vol. 41, No. 3, pp. 295–311, [https://doi.org/10.1016/S1062-9769\(01\)00084-9](https://doi.org/10.1016/S1062-9769(01)00084-9).
79. Mokyr J. (2018) The past and the future of innovation: Some lessons from economic history. *Explorations in Economic History*, Vol. 69, pp. 13–26, <https://doi.org/10.1016/j.eeh.2018.03.003>.
80. Mukhopadhyay P., Chaudhuri B.B. (2015) A survey of Hough Transform. *Pattern Recognition*, Vol. 48, No. 3, pp. 993–1010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.08.027>
81. Nath N.D., Akhavian R., Behzadan A.H. (2017) Ergonomic analysis of construction worker's body postures using wearable mobile sensors. *Applied ergonomics*, Vol. 62, pp. 107–117. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.02.007>
82. Nuvolari A. (2019) Understanding successive industrial revolutions: A “development block” approach, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Vol. 32, , pp. 33–44, <https://doi.org/10.1016/j.eist.2018.11.002>.
83. Occhipinti E., Colombini D. (2016) A toolkit for the analysis of biomechanical overload and prevention of WMSDs: Criteria, procedures and tool selection in a step-by-step approach. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 52, pp. 18–28.
84. Occhipinti E., Colombini D. (2016) A toolkit for the analysis of biomechanical overload and prevention of WMSDs: Criteria, procedures and tool selection in a step-by-step approach. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 52, pp. 18–28.
85. Park J., Yang X., Cho Y.K., Seo J. (2017) Improving dynamic proximity sensing and processing for smart work-zone safety. *Automation in Construction*, Vol. 84, pp. 111–120. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.025>.
86. Pavlakos G., Zhu L., Zhou X., Daniilidis K. (2018) Learning to estimate 3D human pose and shape from a single color image. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
87. Peppoloni L., Filippeschi A., Ruffaldi E., Avizzano C.A. (2016) A novel wearable system for the online assessment of risk for biomechanical load in repetitive efforts. *International Journal of Industrial Ergonomics*. Vol.52, pp. 1–11.
88. Perlo J., Mülder C., Danieli E., Hopmann C., Blümich B., Casanova F. (2016) Digital processing of images of extruded rubber profiles for process control MRI. *Measurement*, Vol. 82, pp. 466–475.

89. Pilloni V. (2018) How Data Will Transform Industrial Processes: Crowdsensing, Crowdsourcing and Big Data as Pillars of Industry 4.0. *Future Internet*, Vol. 10, No. 3, #24. doi: <https://dx.doi.org/10.3390/fi10030024>.
90. Qian J.-P., Yang X.-T., Wu X.-M., Zhao L., Fan B.-L., Xing B. (2012) A traceability system incorporating 2D barcode and RFID technology for wheat flour mills. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 89, pp. 76-85.
91. Rauwendaal C. (2019) Understanding Extrusion. Hanser: Elsevier (Chapter5 - How an Extruder Works). <https://doi.org/10.3139/9781569906996.005>.
92. Razavian M., Paech B., Tang A. (2019) Empirical research for software architecture decision making: An analysis. *Journal of Systems and Software*, Vol. 149, pp. 360-381, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2018.12.003>.
93. Resnick, M.L., Chaffin, D.B. (1995) An ergonomic evaluation of handle height and load in maximal and submaximal cart pushing. *Appl. Ergon*, Vol. 26, pp. 173–178.
94. Sala G., Rosso A., Tornese F., Piga G., Malorgio B. (2018) Barriers, Drivers and Impact of a Simplified Occupational Safety and Health Management System in Micro and Small Enterprises. In *Advances in Safety Management and Human Factors: Proceedings of the AHFE 2018 International Conference on Safety Management and Human Factors*, July 21-25, 2018, Loews Sapphire Falls Resort at Universal Studios, Orlando, Florida, USA (Vol. 791, p. 81). Springer.
95. Savaliya P.V., Somani S.B., Shete V.V. (2015) A Bluetooth Tele Health, Household Security and Industry Safety Realization by Android Smartphone”. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, Vol. 4, No. 6, pp. 382-385. doi: <https://dx.doi.org/10.17148/IJARCCCE.2015.4683>.
96. Savaliya P.V., Somani S.B., Shete V.V. (2015) A Bluetooth Tele Health, Household Security and Industry Safety Realization by Android Smartphone”. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, Vol. 4, No. 6, pp. 382-385. <https://dx.doi.org/10.17148/IJARCCCE.2015.4683>.
97. Savolainen J., Collan M. (2020) How Additive Manufacturing Technology Changes Business Models? – Review of Literature. *Additive Manufacturing*, Vol. 32, No. 101070, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101070>.
98. Schaefer P., Boocock M., Rosenberg S., Jäger M., Schaub Kh. (2007) A target-based population approach for determining the risk of injury associated with manual pushing and pulling. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 37, No. 11–12, pp. 893-904.
99. Schall Jr M.C., Sesek R.F., Cavuoto L.A. (2018) Barriers to the Adoption of Wearable Sensors in the Workplace: A Survey of Occupational Safety and Health Professionals. *Human factors*. Vol. 60, No. 3, pp. 351-362. doi: <https://doi.org/10.1177/0018720817753907>.
100. Shin M., Lee H.S., Park M., Moon M., Han S. (2014) A system dynamics approach for modeling construction workers’ safety attitudes and behaviors. *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 68, pp. 95-105. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.09.019>.
101. Snook S.H., Ciriello V.M. (1991) The design of manual handling tasks: revised tables of maximum acceptable weights and forces. *Ergonomics*, Vol 34., No. 9., pp. 1197-1213.
102. Suárez Sánchez A., Iglesias-Rodríguez F.J., Riesgo Fernández P., de Cos Juez F.J. (2016) Applying the K-nearest neighbor technique to the classification of workers

- according to their risk of suffering musculoskeletal disorders. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 52, pp. 92-99.
103. Swedish Work Environment authority (2012) *Ergonomics for the Prevention of Musculoskeletal Disorders 2012*, Vol. 2 (Stockholm, Sweden).
104. Szydło T., Konieczny M. (2016) Mobile and wearable devices in an open and universal system for remote patient monitoring. *Microprocessors and Microsystems*, Vol. 46, pp. 44-54. doi: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2016.07.00.6>.
105. Theado E.W., Knapik G.G., Marras W.S. (2007) Modification of an EMG-assisted biomechanical model for pushing and pulling. *International Journal of Industrial Ergonomics.*, Vol. 37, No. 11–12, pp. 825-831.
106. Toynbee A. (1884) *Lectures on the Industrial Revolution in England*.
107. Vicentini F. (2020) Terminology in safety of collaborative robotics. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 63, No. 101921, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101921>.
108. Vukicevic A.M., Djapan M., Stefanovic M., Macuzic I. (2019) SafE-Tag mobile: A novel javascript framework for real-time management of unsafe conditions and unsafe acts in SMEs. *Safety Science*, Vol. 120, pp. 507-516, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.07.024>.
109. Vukicevic A.M., Djapan M., Todorovic P., Erić M., Stefanovic M., Macuzic I. (2019) Decision Support System for Dimensional Inspection of Extruded Rubber Profiles. *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 112605-112616, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2934561>.
110. Wahlström B., Rollenhagen C. (2014) Safety management – A multi-level control problem. *Safety Science*. Vol. 69, pp. 3-17. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.06.002>.
111. Waters T., Lloyd J.D., Hernandez E., Nelson A. (2011) AORN ergonomic tool 7: pushing, pulling, and moving equipment on wheels. *AORN J.*, Vol. 94, No. 3, pp. 254-60. doi: 10.1016/j.aorn.2010.09.035.
112. Watson D.P., Scheidt D.H. (2005) *Autonomous Systems*, Johns Hopkins Applied Physics Laboratory, Technical Digest, Vol. 26, No. 4.
113. Wilhelm B., Mark B. (2013) *Digital Signal Processing*. Springer-Verlag London, (Chapter 1). <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-919-0>.
114. Wilson D. C. S. (2014) Arnold Toynbee and the Industrial Revolution: The Science of History. *Political Economy and the Machine Past.*, Vol. 26, No. 2, pp. 133-161. DOI: 10.2979/histmemo.26.2.133
115. World Health Organization (2017) *Guidelines on community-level interventions to manage declines in intrinsic capacity*. Geneva: (<https://www.who.int/ageing/publications/guidelines-icope/en/>).
116. Wu F., Wu T., Yuce M. (2019) An Internet-of-Things (IoT) Network System for Connected Safety and Health Monitoring Applications. *Sensors*, Vol 19, No. 1, pp. 1-21. doi: <https://dx.doi.org/10.3390/s19010021>.
117. Yeow P.H.P., Sen R.N. (2003) Quality, productivity, occupational health and safety and cost effectiveness of ergonomic improvements in the test workstations of an electronic factory. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 32, No. 3, pp. 147–163.

118. Zou P.X., Lun P., Cipolla D., Mohamed S. (2017) Cloud-based safety information and communication system in infrastructure construction". Safety science, Vol. 98, pp. 50-69. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.05.006>.
119. Zou P.X.W., Lun P., Cipolla D., Mohamed S. (2017) Cloud-based safety information and communication system in infrastructure construction. Safety Science, Vol. 98, pp. 50-69, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.05.006>.



**Биографија аутора**

Арсо Вукићевић, рођен 16. 06. 1987. године у Никшићу, Република Црна Гора, СФРЈ, од оца Миладина и мајке Велимирке, завршио је Основну школу „Милоје Симовић“ у Крагујевцу; потом је средњешколско образовање стекао у „Првој техничкој школи“ на смеру „Електротехничар рачунара“, такође у Крагујевцу.

Основне академске студије на Машинском факултету у Крагујевцу уписао је школске 2006/2007. године, а дана 20. 10. 2009. је завршио студије као студент генерације на поменутом факултету на смеру Информатика у инжењерству са општим успехом 9,43 (девет 43/100) у току студија. Мастер студије на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу уписао је школске 2009/2010. године, а дана 04.07.2011. завршио студије као студент генерације на поменутом факултету на смеру Информатика у инжењерству са општим успехом 9,94 (девет 94/100) у току студија.

Током студија, био је стипендиста Министарства просвете и науке Републике Србије. Био је добитник стипендије Универзитета у Крагујевцу, која се додељује најбољим студентима Универзитета. Био је један од добитника награде за допринос и афирмацију и промоцију имена Факултета у земљи и свету поводом педесетогодишњице факултета 2010 године.

Докторске академске студије уписао је школске 2011/12. године на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу, на смеру за примењену информатику и рачунарско инжењерство – а завршио 2015/2016.

Кандидат је коаутор преко 30 научних радова објављених у међународним и националним часописима, као и на међународним конференцијама. Хронолошки списак публикација који се аутоматски ажурира доступан је на интернет страници: <https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=vlrZKl8AAAAJ>.



**ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Ја, Арсо М. Вукићевић, изјављујем да докторска дисертација под насловом:

Унапређење перформанси процеса у LEAN индустријским системима  
применом технолошких пиlara Индуcтрије 4.0

која је одбрањена на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу Универзитета у Крагујевцу представља *оригинално ауторско дело* настало као резултат *сопственог истраживачког рада*.

*Овом Изјавом такође потврђујем:*

- да сам *једини аутор* наведене докторске дисертације,
- да у наведеној докторској дисертацији *нисам извршио/ла повреду* ауторског нити другог права интелектуалне својине других лица,
- да умножени примерак докторске дисертације у штампаној и електронској форми у чијем се прилогу налази ова Изјава садржи докторску дисертацију истоветну одбрањеној докторској дисертацији.

У Крагујевцу, 30.11.2020. године,

  
потпис аутора

**ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Ја, Арсо М. Вукићевић,

дозвољавам

не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

Унапређење перформанси процеса у LEAN индустријским системима  
применом технолошких пиlara Индустрије 4.0

која је одбрањена на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Универзитета у Крагујевцу, и то у целини, као и да по један примерак тако умножене докторске дисертације учини трајно доступним јавности путем дигиталног репозиторијума Универзитета у Крагујевцу и централног репозиторијума надлежног министарства, тако да припадници јавности могу начинити трајне умножене примерке у електронској форми наведене докторске дисертације путем *преузимања*.

Овом Изјавом такође

дозвољавам

не дозвољавам<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уколико аутор изабере да не дозволи припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци, то не искључује право припадника јавности да наведену докторску дисертацију користе у складу са одредбама Закона о ауторском и сродним правима.

припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од следећих *Creative Commons* лиценци:

- 1) Ауторство
- 2) Ауторство - делити под истим условима
- 3) Ауторство - без прерада
- 4) Ауторство - некомерцијално
- 5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
- 6) Ауторство - некомерцијално - без прерада<sup>2</sup>

У Крагујевцу \_\_\_\_\_, 30.11.2020. године,

  
\_\_\_\_\_

потпис аутора

---

<sup>2</sup> Молимо ауторе који су изабрали да дозволе припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци да заокруже једну од понуђених лиценци. Детаљан садржај наведених лиценци доступан је на: <http://creativecommons.org.rs/>