



**УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ - СКОПЈЕ**



Александар Радован Аргировски

**РАЗВОЈ НА РАМКА ЗА ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА НА ДИГАЛНА
ТРАНСФОРМАЦИЈА ВО ПРОИЗВОДСТВЕНИТЕ КОМПАНИИ
БАЗИРАНА НА LEAN МЕНАџМЕНТ**

Докторски труд

Скопје, 2026



УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ - СКОПЈЕ



Александар Радован Аргировски

**РАЗВОЈ НА РАМКА ЗА ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА НА ДИГАЛНА
ТРАНСФОРМАЦИЈА ВО ПРОИЗВОДСТВЕНИТЕ КОМПАНИИ
БАЗИРАНА НА LEAN МЕНАџМЕНТ**

Докторски труд

Скопје, 2026

Докторанд:
АЛЕКСАНДАР АРГИЛОВСКИ

Тема:
РАЗВОЈ НА РАМКА ЗА ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА НА ДИГИТАЛНА ТРАНСФОРМАЦИЈА ВО
ПРОИЗВОДСТВЕНИТЕ КОМПАНИИ БАЗИРАНА НА LEAN МЕНАЏМЕНТ

Ментор:
проф.д-р БОЈАН ЈОВАНОВСКИ,
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Машински Факултет - Скопје

Комисија за одбрана:
проф.д-р РОБЕРТ МИНОВСКИ (претседател)
Установа од која доаѓа

проф.д-р БОЈАН ЈОВАНОВСКИ,
Установа од која доаѓа

проф.д-р АТАНАС КОЧОВ,
Установа од која доаѓа

проф.д-р РАДМИЛ ПОЛЕНАКОВИЌ,
Установа од која доаѓа

проф.д-р ФАЗЕЛ АНСАРИ,
Установа од која доаѓа

Научна област:
ИНДУСТРИСКО ИНЖЕНЕРСТВО И МЕНАЏМЕНТ

Датум на одбрана: 22.5.2026

Александар Радован Аргировски

РАЗВОЈ НА РАМКА ЗА ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА НА ДИГИТАЛНА ТРАНСФОРМАЦИЈА ВО ПРОИЗВОДСТВЕНИТЕ КОМПАНИИ БАЗИРАНА НА LEAN МЕНАЏМЕНТ

- А п с т р а к т -

Зголемената глобална конкуренција и барањата за време, квалитет, флексибилност и ниски трошоци ја наметнуваат потребата од постојано унапредување на производните системи. Истовремено, технолошкиот напредок им наметнува на компаниите да воведуваат дигитални технологии за да останат конкурентни. Сепак, дигиталната трансформација носи бројни предизвици, а проектите често имаат висок процент на неуспех. И покрај тоа што националните стратегии го препознаваат овој проблем, прашањата за организациска подготвеност, фазна имплементација и интеграција со Lean менаџментот сè уште не се доволно разработени. Дигиталната трансформација во производството е комплексен процес што вклучува стратешки, технолошки и организациски промени, а недостатокот на систематски пристап особено ги погодува МСП.

Во почетните поглавја од трудот е даден преглед на литературата за технолошката револуција и дигиталната трансформација, со осврт на Индустрија 4.0 и Индустрија 5.0, клучните дигитални технологии и Lean принципите. Во четвртото поглавје се презентира рамка за имплементација низ фазите: конципирање, структурирање, евалуирање и документирање. Петтото поглавје ја поврзува рамката со експериментално истражување преку избор и мерење на показатели за дигитална култура, вредност и интензитет. Дизајнирани се петнаесет производствени сценарија во кои се мерат и анализираат соодветните показатели со цел оценка на влијанието на дигиталните иницијативи.

Резултатите од истражувањето укажуваат дека предложената рамка за дигитална трансформација во производството е сеопфатна и методолошки конзистентна во однос на активностите што треба да се спроведат при вакви иницијативи, што е потврдено и преку процесот на експертска верификација. Дополнително, преку интегрираниот систем за мерење на учинокот се забележуваат промени во продуктивноста низ сценаријата, односно во дигитална култура, дигитална вредност и дигитален интензитет. Овие наоди покажуваат дека дигиталната трансформација директно да влијае врз подобрување на перформансите и создавање мерлива бизнис вредност во производствените претпријатија.

Клучни зборови: дигитална трансформација, Lean менаџмент, фабрика за учење, производство, показатели, мерење на учинок.

Aleksandar Argilovski

DEVELOPMENT OF FRAMEWORK FOR IMPLEMENTATION OF DIGITAL TRANSFORMAMTION IN MANUFACTURING COMPANIES BASED ON LEAN MANAGEMENT

- A b s t r a c t -

Increased global competition and demands for time, quality, flexibility and low costs impose the need for continuous improvement of production systems. At the same time, technological progress is pressuring companies to introduce digital technologies in order to remain competitive. However, digital transformation brings numerous challenges, and projects often have a high failure rate. Although national strategies recognize this problem, the issues of organizational readiness, phased implementation and integration with Lean management have not yet been sufficiently developed. Digital transformation in production is a complex process that includes strategic, technological and organizational changes, and the lack of a systematic approach particularly affects SMEs.

The initial chapters of the paper provide an overview of the literature on the technological revolution and digital transformation, with a focus on Industry 4.0 and 5.0, key digital technologies and Lean principles. The fourth chapter presents a framework for implementation through the phases: conceptualization, structuring, evaluation and documentation. The fifth chapter links the framework to experimental research by selecting and measuring indicators of digital culture, value and intensity. Fifteen manufacturing scenarios have been designed in which the relevant indicators are measured and analysed in order to assess the impact of digital initiatives.

The results of the research indicate that the proposed framework for digital transformation in manufacturing is comprehensive and methodologically consistent in terms of the activities that need to be implemented in such initiatives, which is also confirmed through the expert verification process. In addition, through the integrated performance measurement system, changes in productivity across the scenarios, i.e. in digital culture, digital value and digital intensity, are observed. These findings show that digital transformation can directly affect the improvement of performance and the creation of measurable business value in manufacturing enterprises.

Keywords: digital transformation, Lean management, learning factory, manufacturing, key performance indicators, performance measurement.

ИЗЈАВА

Изјавувам дека докторскиот труд е оригинален труд и дека го имам работено самостојно, дека уредно ги цитирам сите користени извори и литература и дека трудот не е користен во рамките на други универзитетски студии или за стекнување на друго звање.

м-р Александар Аргировски

ИЗЈАВА

Изјавувам дека електронската верзија на докторскиот труд е идентична со отпечатениот докторски труд.

м-р Александар Аргировски

СОДРЖИНА

1. ВОВЕД	15
1.1. Предмет на трудот	16
1.2. Цели на трудот	17
1.3. Мотивација и релевантност на темата	18
2. ТЕХНОЛОШКА РЕВОЛУЦИЈА.....	26
2.1. Дефинирање на Индустрија 4.0	26
2.1.1. Дигитални технологии на Индустрија 4.0	27
2.1.2. Принципи на Индустрија 4.0.....	43
2.1.3. Придобивки од Индустрија 4.0	44
2.2. Човекот во Индустрија 4.0.....	45
2.3. Согледувања и заклучоци	47
3. ДИГИТАЛНА ТРАНСФОРМАЦИЈА ВО ПРОИЗВОДСТВОТО	49
3.1. Сроеви на дигиталната трансформација	53
3.1.1. Принципи на Lean	57
3.1.2. Придобивки на Lean.....	59
3.1.3. Алатки на Lean.....	60
3.2. Врска помеѓу Lean и дигиталните технологии.....	61
3.4. Согледувања и заклучоци	66
4. РАМКА ЗА ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА НА ДИГИТАЛНА ТРАНСФОРМАЦИЈА.....	69
4.1. Конципирање	70
4.1.1. Дефинирање на потребата и проблемот.....	71
4.1.2. Дефинирање на целта	85
4.2. Структурирање	85
4.2.1. Дефинирање на барањата	85
4.2.2. Решенија на барањата	92
4.2.3. Интеграција на решенијата и барањата.....	94
4.3. Евалуирање	107
4.3.1. Бенчмаркинг.....	108
4.3.2. Експертска евалуација	108
4.4. Документирање.....	112
4.5. Согледувања и заклучоци	113
5. СТУДИИ НА СЛУЧАИ.....	117

5.1. Smart Learning Factory - Skorje	119
5.2. Основни информации за истражувањето	123
5.2.1. Производ	123
5.2.2. Производствени сценарија	124
5.2.3. Показатели за учинокот	128
5.2.4. План за собирање на податоците	132
5.3. Резултати од експериментите	137
5.3.1. Изведување на експериментите	137
5.3.2. Показатели за дигитална вредност	139
5.3.3. Показатели за дигитална култура	159
5.3.4. Показатели за дигитален интензитет.....	165
5.3.5. Дигитална зрелост.....	172
5.4. Анализа на взаемното влијание на показателите	174
5.5. Согледувања и заклучоци	186
6. ЗАКЛУЧОЦИ И НАСОКИ ЗА ИДНИ ИСТРАЖУВАЊА	193
6.1. Преглед на сработеното	193
6.2. Примена на резултатите од истражувањето.....	196
6.3. Насоки за идни истражувања	197
7. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА	198

Список со слики

Слика 2.1 Индустриски револуции.....	26
Слика 2.2 Концепт за дефинирање на Индустрија 4.0.....	27
Слика 2.3 Екосистем на Индустрија 4.0.....	29
Слика 2.4 Рамка на функционирање на големи податоци и аналитика.....	30
Слика 2.5 Инка на големите податоци и аналитика.....	31
Слика 2.6 Визуелизација на односот на податоците и компаниската стратегија.....	31
Слика 2.7 Рамка на функционирање на интернет на нештата.....	32
Слика 2.8 Генеричка шема на функционирање на робот.....	33
Слика 2.9 Споредба на типовите на работи според критериуми.....	34
Слика 2.10 Рамка на функционирање на технологијата на преместување на облак.....	35
Слика 2.11 Оперативен модел на облак-производство.....	35
Слика 2.12 Процес на адитивно производство.....	36
Слика 2.13 Технологии на проширена реалност.....	37
Слика 2.14 Рамка на функционирање на технологијата на аугментирана реалност.....	38
Слика 2.15 Визуелизација на хоризонтална и вертикална интеграција во производство.....	39
Слика 2.16 Интеграција на системите на ниво на синџир на снабдување.....	39
Слика 2.17 Логика зад потребата од сајбер безбедност.....	40
Слика 2.18 Рамка за изведување на симулациите.....	41
Слика 2.19 Симулациски алатки кај И4.0.....	41
Слика 2.20 Рамка на функционирање на вештачка интелигенција за оптимизација во производството.....	42
Слика 2.21 Рамка на функционирање на сајбер-физичките системи.....	43
Слика 2.22 Врски помеѓу триото на Индустрија 4.0.....	45
Слика 2.23 Тренд анализа за И4.0 и И5.0.....	46
Слика 2.24 Технологии на Индустрија 4.0.....	48
Слика 3.1 Тренд на пребарување на термините дигитизација, дигитализација и дигитална трансформација.....	49
Слика 3.2 Тренд на објавување на трудови на Scopus.....	50
Слика 3.3 Врска помеѓу дигитизација, дигитализација и дигитална трансформација.....	52
Слика 3.4 Слоевеи на дигиталната трансформација.....	54
Слика 3.5 Тојота произведен систем.....	55
Слика 3.6 Визуелизација на принципите на Lean.....	57
Слика 3.7 Придобивките од Lean од различни перспективи.....	59
Слика 3.8 Концепт на зрелост на врската помеѓу Lean и дигиталните технологии.....	62
Слика 3.9 Типови на врски помеѓу Lean и Индустрија 4.0.....	62
Слика 3.10 Анализа на застапеност на концептите на интеракција на Lean и И4.0 во литературата.....	63
Слика 3.11. Логика на симбиозата на Lean и дигиталните технологии.....	64
Слика 3.12 Куќа на Lean 4.0.....	67
Слика 3.13 Трансформација на архитектурата на системите на Индустрија 4.0.....	68
Слика 4.1 “Mind map” за предметот на истражување.....	71
Слика 4.2 Поврзаност на проблемите и потребите.....	72

Слика 4.3 Статистички податоци за прегледаната литература.....	77
Слика 4.4 IMPULS индекс на зрелост за македонските МСП	81
Слика 4.5 Процент статус на дигитализација на македонските компании	82
Слика 4.6 Ниво на стандардизирани и дигитализирани бизнис процеси.....	82
Слика 4.7 Проценка на потребите за компетенции во македонските компании	83
Слика 4.8 Трансформација на потребите во барања	86
Слика 4.9 Декомпозиција на барањето за имплементација на Lean-размислувањето преку принципите на Lean во рамката за дигитална трансформација.....	87
Слика 4.10 Барања кои треба да ги исполни рамката во поглед на предизвиците за ДТ	88
Слика 4.11 Статистички податоци за прегледаната литература	89
Слика 4.12 Декомпозиција на барањата	91
Слика 4.13 Нивоа на деталност на рамката	94
Слика 4.14 Визуелизација на редоследот на имплементација на слоевите за ДТ	95
Слика 4.15 Распоред на главните и континуираните активности.....	97
Слика 4.16 Интеграција на специфичните активности во рамката	100
Слика 4.17 Статистички податоци за прегледот на литературата за активности за имплементирање на дигитална трансформација.....	101
Слика 4.18 Визуелизација на деталните специфични активности	102
Слика 4.19 Имплементација на Lean принципите.....	103
Слика 4.20 Област на имплементација.....	105
Слика 4.21 Визуелизација на димензиите на показатели за дигитална трансформација	106
Слика 4.22 Промена на имињата на специфичните активности.....	107
Слика 4.23 (а) Индустрија и (б) искуство на евалуаторите	109
Слика 4.24 Резултати од експертската евалуација.....	110
Слика 4.25 Резултати од евалуацијата на студентите.....	111
Слика 4.26 Swimlane дијаграм за користење на рамката.....	116
Слика 5.1 Концепт на фабрики за учење според Универзитетот Пен Стејт	119
Слика 5.2 Чекори на едно просечно производствено претпријатие	119
Слика 5.3 Екосистем на SLFS	120
Слика 5.4 Инфраструктура на SLFS	122
Слика 5.5 2Д цртеж од SLFS	123
Слика 5.6 Избран производ за монтажа при студиите на случаи	123
Слика 5.7 Шема за монтажа	124
Слика 5.8 Карактеристично сценарио - Сценарио 3	126
Слика 5.9 Карактеристично сценарио - Сценарио 8	127
Слика 5.10 Начин на спроведување на експериментот.....	132
Слика 5.11 Образец за собирање на податоците при снимањата.....	135
Слика 5.12 Спроведување на експериментите	139
Слика 5.13 Преглед на сценарија и типот на сценарија.....	139
Слика 5.14 Време на изработка по производствено сценарио	143
Слика 5.15. Време на додадена вредност по производствено сценарио	145

Слика 5.16 Стапка на време на додадена вредност во вкупното производствено по производствено сценарио	146
Слика 5.17 Време на кумулативен застој по производствено сценарио	147
Слика 5.18 Стапка на време на застој по производствено сценарио	148
Слика 5.19 Пропусност по производствено сценарио	150
Слика 5.20 Добри парчиња и количина на шкарт по сценарио.....	151
Слика 5.21 Стапка на квалитет.....	152
Слика 5.22 Број на грешки при изработка	153
Слика 5.23 Број на грешки по производ.....	154
Слика 5.24 Севкупна ефективност на работната сила по производствено сценарио	155
Слика 5.25 Цена на чинење на застојот и шкартот	156
Слика 5.26 Удел на одделните типови на трошоци во вкупните трошоци.....	157
Слика 5.27 Индекс за флексибилност.....	158
Слика 5.28 Ниво на прилагодување на промените (сценаријата).....	160
Слика 5.29 Ниво на проценет когнитивен напор.....	161
Слика 5.30 Ниво на проценет физички напор	162
Слика 5.31 Проценето ниво на мотивација.....	163
Слика 5.32 Ниво на вклученост во донесување на одлуки	164
Слика 5.33 Ниво на леснотија за употреба на решенијата	165
Слика 5.34 Стапка на дигитално потпомогнати чекори/активности.....	167
Слика 5.35 Стапка на дигитално потпомогнати чекори со наспроти без тежински фактори.....	168
Слика 5.36 Број на искористени технологии по сценарио	169
Слика 5.37 Број на софтвери и дигитални уреди по сценарио	169
Слика 5.38 Теоретски број на парчиња по сценарио	171
Слика 5.39 Време на поврат на инвестицијата	172
Слика 5.40 Дигитална зрелост на сценаријата во SLFS според IMPULS.....	173
Слика 5.41 Дигитална зрелост на македонските МСП според IMPULS	174
Слика 5.42 Споредба на зрелоста помеѓу SLFS и македонските МСП.....	174
Слика 5.43 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за NM и RZ.....	178
Слика 5.44 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за DZR и ti.....	180
Слика 5.45 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за DZR и RZ	181
Слика 5.46 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за DZR и GIR	182
Слика 5.47 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за RDZ и FI.....	183
Слика 5.48 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за ROI и PP	184
Слика 5.49 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за DZTR и PM.....	185
Слика 5.50 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за DZR и PMN	185
Слика 5.51 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за DZTI и PFN.....	186
Слика 5.52. Улога на фабриката за учење во истражувањето	187
Слика 5.53 Очекувани резултати	187
Слика 5.54. Предложен модел на зрелост	188
Слика 5.55 Поврзаност на студиите на случаи со рамката за ДТ	191

Список со табели

Табела 2.1 Преглед на литературата за листата на дигитални технологии.....	27
Табела 2.2 Најзастапени технологии на И4.0 во литературата	28
Табела 2.3 Квалитативна компаративна анализа според избраните критериуми.....	46
Табела 3.1 Дефиниции на термините	51
Табела 3.2 Преглед на литературата за слоевите на дигитална трансформација.....	53
Табела 3.3 Споредба на традиционално и Lean производство.....	60
Табела 3.4 Поврзување на Lean-алатките и придобивките од Lean	60
Табела 3.5. Анализа на вкрстени влијанија помеѓу Lean принципи и дигитални технологии	64
Табела 3.6. Анализа на вкрстени влијанија помеѓу дигитални технологии и Lean загуби	65
Табела 4.1 Споредба на методите за дизајн на концептуална рамка	69
Табела 4.2 Преглед на активностите во фазите на развој на рамката.....	70
Табела 4.3 Преглед на постоечки рамки за дигитална трансформација	75
Табела 4.4 Застапеност на Lean принципите во постоечките рамки за ДТ	76
Табела 4.5 Пречки за успешна дигитална трансформација.....	77
Табела 4.6 Имплементациски насоки во стратегиите на Република С. Македонија	84
Табела 4.7 Концептуална тријада.....	85
Табела 4.8 Принципи на Lean во контекст на дигитална трансформација	86
Табела 4.9 Барања за решавање на предизвиците за ДТ.....	87
Табела 4.10 Клучни зборови за класификација на литературата.....	90
Табела 4.11 Групирање на активности по слоевите на ДТ	90
Табела 4.12 Сумирани барања за рамката на ДТ	93
Табела 4.13 Идентификација на главните и континуираните активности	96
Табела 4.14 Типови на активности за имплементација низ другите проектни методологии	98
Табела 4.15 Споредба на постоечките методологии со PMI	98
Табела 4.16 Дел од специфичните активности во секоја од групите	102
Табела 4.17 Евалуација на рамката со бенцмаркинг	108
Табела 4.18 Начини на имплементација на барањата	114
Табела 5.1 Споредба на реални претпријатија со фабрики за учење	118
Табела 5.2 Барања за фабриките за учење и имплементација во SLFS	121
Табела 5.3 Морфологија на Smart Learning Factory - Скопје	121
Табела 5.4 Избор на показатели за мерење со методот „Must criteria“	130
Табела 5.5 Конечна листа на показатели за мерење	131
Табела 5.6. План за собирање на податоците.....	136
Табела 5.7 Сценарија во SLFS.....	137
Табела 5.8 Тежински фактори на дигитализацијата на сценаријата.....	167
Табела 5.9 Поделба на показателите на групи согласно нивното влијание	175
Табела 5.10 Интерпретација на коефициентите на корелација.....	176
Табела 5.11 Корелативна матрица за сите показатели	177
Табела 5.12 Свкупна ефикасност на работната сила - дефинирање и пресметка	189

Табела 5.13 Индекс за флексибилност - дефинирање и пресметка	190
Табела 6.1. Преглед на постигнатите цели во истражувањето.....	193

1. ВОВЕД

Останувањето конкурентни на сè подинамичните пазари бара од производствените компании, особено од малите и средни претпријатија (МСП), да одговорат на растечката глобална побарувачка и брзиот технолошки развој преку усвојување иницијативи за дигитална трансформација (ДТ). Во овој контекст, производствената парадигма се поместува кон Индустрија 4.0 (И4.0) и сајбер-физички системи фокусирани на човекот (CPS), бидејќи индустрискиот раст сè повеќе зависи од примена на дигитални технологии кои овозможуваат поодржливи и поотпорни производствени системи [1], [2].

Сепак, и покрај силниот притисок од пазарот, голем број од проектите за имплементација на ДТ сè уште завршуваат неуспешно, како што е наведено во релевантната литература [3], [4], како и во анализите на Boston Consulting Group [5] и McKinsey & Company [6]. Пријавената глобална стапка на неуспех на ДТ проекти се движи помеѓу 70% и 90%. Ова најчесто се поврзува со низа предизвици во имплементацијата, кои честопати не се директно поврзани со самата технологија. Една понова студија од 2025 година [7] покажува дека најчесто пријавениот предизвик во литературата е јазот во вештини, кој се појавува во 84% од анализираниите извори. Потоа следуваат безбедносни прашања, управување со промените, буџетски ограничувања, недостаток на стратегија и отсуство на соодветно управување. Други предизвици, како организациска култура, недостиг од стандардизација на процесите, несоодветна инфраструктура, занемарување на клиентите и прекумерен фокус на технологијата, се појавуваат во помалку од 50% од изворите. Согласно на ова, литературата потврдува дека дигиталната трансформација оди подалеку од интуитивно усвојување на технологија и бара стратешка и културна подготвеност [8], [9].

Од локална перспектива, искуството на авторот со македонските производствени МСП во изминатите пет години покажува дека компаниите генерално се заинтересирани за усвојување дигитални технологии и често пријавуваат дека започнале технолошки ориентирани проекти. Сепак, овие иницијативи најчесто се изолирани софтверски решенија и ретко се поврзани со поширока стратегија на компанијата. Дополнително, прегледот на националните стратешки документи, како Националната ИКТ стратегија (2023-2027), Националната развојна стратегија (2024-2044) и Стратегијата за паметна специјализација, покажува дека ДТ претежно се разгледува од аспект на нејзината важност, додека недостигаат насоки за тоа како производствените компании треба да ја имплементираат [10], [11], [12].

Од академска перспектива, и покрај значителниот пораст на истражувања поврзани со ДТ [13], [14], повеќето студии се фокусираат на поединечни технологии [15], стратегии [16], [17], [18] или проценка на зрелост [19], додека практичните насоки за имплементација остануваат ограничени. Проширениот преглед на литературата за рамки за имплементација на ДТ и Индустрија 4.0 [20] покажува дека, иако постојната литература нуди вредни сознанија за специфични аспекти на ДТ, насоките за имплементација остануваат фрагментирани и во научната литература и во националните стратешки документи.

Рамки за имплементација поврзани со конкретни дигитални технологии како интернет на нештата [21], облак [22] и дигитален близинак [23] се релативно чести, што е оправдано со бројните нови технологии во последните години. Неколку постојни рамки доминантно се фокусираат на стратешките [18], [24], [25], [26], додека други ги поврзуваат со доменот на луѓето [27], [28]. Рамки произлезени од практики за подобрување на процеси, како Lean Six Sigma, исто така се присутни во литературата и

се насочени кон оптимизација на процесите со помош на технологија [29], [30]. Општиот заклучок од прегледите е дека многу пристапи примарно ги нагласуваат стратешките или технолошките аспекти, додека релативно помалку внимание се посветува на процесните и човечките димензии. Истовремено, општата литература за ДТ конзистентно укажува дека успешната трансформација зависи од интеграцијата на овие димензии [31], [32]. Во анализираните рамки, Lean менаџментот не е позициониран како фундаментален елемент за имплементација на ДТ, а дополнително, само две рамки се експлицитно означени како поврзани со производството, додека останатите се со општ карактер [26], [29]. Од друга страна, литературата укажува дека Lean практиките имаат значително влијание во намалување на одредени бариери при имплементација на технологии [33]. Со оглед на тесната поврзаност меѓу континуираното подобрување и мерењето на перформансите [34], постоечките рамки ретко адресираат како систематски да се оцени успехот на ДТ иницијативите. Повеќето извори напоменуваат ограничувања во однос на верификацијата и укажуваат на потреба од емпириска или експертска валидација.

Со цел да се адресираат идентификуваните јазови во литературата, ова истражување користи адаптирана методологија за развој на рамка [35]. Развиената рамка базирана на барањата на академијата, индустријата и државата, верификувана е од страна на експерти, а интегрираниот систем за мерење на учинокот како главен аспект на подобрување на организациите е дополнително обработен низ студии на случаи во кои се мерат избрани показатели во три столба: дигитална култура, дигитална вредност и дигитален интензитет.

1.1. Предмет на трудот

Предмет на истражување во оваа докторска дисертација е развој на методологија за имплементација на дигитална трансформација во производствените компании, која ќе биде базирана на принципите на Lean менаџмент. Истражувањето ги опфаќа клучните аспекти на синергијата меѓу Lean менаџментот и дигиталните технологии, со фокус на нивното влијание врз производствената стабилност, ефикасност и целокупната продуктивност. Специфичен акцент ќе биде ставен на истражување на улогата на Lean како основа и претходник за успешна дигитална трансформација, каде што елиминацијата на загубите, оптимизацијата на процесите и културата на постојано подобрување создаваат предуслови за ефективно користење на дигитални решенија.

Истражувањето се занимава со предизвиците и барањата за дигитална трансформација, разгледувајќи ги специфичните потреби на производствените компании, приоритетите дефинирани во стратешките документи на Република Северна Македонија и очекувањата на пошироката академска и деловна заедница. Како дел од ова истражување, ќе биде развиена и верификувана рамка за дигитална трансформација која ги инкорпорира Lean принципите за да обезбеди одржливост и структурираност во процесот на трансформација. Рамката ќе овозможи практичен пристап за управување со дигиталната трансформација, дефинирајќи чекори, алатки и показатели за мерење на успехот.

Дополнително, во делот на верификацијата на рамката, истражувањето ќе се фокусира на системот за мерење на учинокот предложен во рамката. Во текот на студиите на случаи, дизајнирани ќе бидат производствени сценарија со различни нивоа на дигитализација и оптимизација, со цел да се испита интегрираното влијание на дигиталните технологии и Lean принципите врз производствените показатели. Врз основа на стандарди, литература, но и потребите на Smart Learning Factory - Skorje, ќе се

анализираат перформансите на производните процеси и нивното подобрување преку примена на дигитални решенија. Преку мерење на избрани показатели, ќе биде прикажан, анализиран и дискутирано влијанието на дигиталната трансформација на производствените показатели во три столба: дигитална култура, дигитална вредност и дигитален интензитет.

1.2. Цели на трудот

Главните цели на докторската дисертација се наведени во продолжение заедно со главните активности кои ќе бидат преземени за остварување на овие цели:

1. Добивање на продлабочени знаења за процесот на дигитална трансформација на производствените компании.

- дефинирање на концептите на дигитизација, дигитализација и дигитална трансформација,
- продлабочени знаења за столбовите и принципите на дигиталната трансформација,
- испитување на постоечките методологии за проценка на зрелоста на компаниите за дигитална трансформација,
- истражување на постоечките методологии за имплементација на дигитална трансформација,
- продлабочени знаења за активностите за развој на динамички капацитети за дигитална трансформација,
- дефинирање на листа на дигитални технологии согласно литературата,
- добивање основни знаења за примената на одделните технологии,
- дефинирање на И4.0 и И5.0 и нивна споредба.

2. Добивање продлабочени знаења за поврзаноста на Lean менаџментот и дигиталните технологии

- продлабочување на знаењата за Lean менаџмент современите производни системи на Индустрија 4.0,
- типови на врски помеѓу Lean и дигиталната трансформација,
- поврзување на Lean алатките и методите со дигиталните технологии.

3. Истражување на предизвиците за дигитална трансформација на производствените компании

- преглед на академските трудови и консултантските извештаи за идентификување на предизвиците за дигитална трансформација во производството,
- истражување на локалните потреби за дигитална трансформација на индустријата во Р.С. Македонија,
- мерење на зрелоста за имплементација на дигитални технологии во Р.С. Македонија.

4. Развој и верификација на рамка за имплементација на дигитална трансформација во производствените компании

- продлабочено знаење за начините за дизајнирање на рамки за имплементација,

- продлабочени знаења за животниот циклус на развој на системите и избор на тип на циклус за потребите за дигитална трансформација,
- развој на предлог-рамка со детално објаснување активностите и излезите на секоја од фазите за имплементација на дигитална трансформација во производството,
- верификација на рамката преку пристап на триангулација,
- развој на метод за оцена на успешноста на дигиталната трансформација (дигитален интензитет, дигитална култура и дигитална вредност).

5. Добивање продлабочени знаења за поврзаноста на Lean менаџментот и дигиталните технологии

- редослед на имплементирање на дигиталните решенија
- критериуми за избор на најрелевантните сценарија,
- документирање на секое од сценаријата,
- избор на показатели и поставување начини на нивното мерење,
- дефинирање на примерок, дизајн на експериментот и начин на собирање на податоците.

6. Експериментално истражување на влијанието на интегрираната имплементацијата на дигиталните технологии и Lean принципите на производствените показатели во различни производни сценарија

- мерење на показателите согласно поставените сценарија,
- визуелизација на резултатите,
- дискусија и носење на заклучоци.

1.3. Мотивација и релевантност на темата

Мотивацијата за истражувањето произлегува од неколку клучни фактори што влијаат врз ограничената успешност на дигиталните и Lean иницијативите во производствениот сектор. Најпрво, глобалните извештаи на познатите консултантски куќи покажуваат дека само мал процент од проектите за дигитална трансформација постигнуваат целосен успех. Истите потврдуваат дека ова се должи на недостатокот на стратешки пристап при имплементацијата и недоволната зрелост на процесите за да ги прифатат новите промени кои доаѓаат со имплементацијата на дигиталните технологии. Дополнително, поради сè посложените барања на клиентите, а намалените рокови за испорака, Lean иницијативите во производствените компании не успеваат да создадат одржливи подобрувања, што дополнително ја нагласува потребата од подобрување на Lean иницијативите преку дигиталните технологии. Славата регулатива и институционална поддршка за дигитална трансформација и Lean менаџмент создава средина во која компаниите се оставени сами да ги совладуваат комплексните предизвици. Тоа резултира со низок степен на зрелост на компаниите во поглед на дигиталната и Lean култура, како и недостаток на стандардизирани, сеопфатни рамки што би го олесниле процесот на трансформација.

Еден од најважните предизвици, воедно и главна мотивација за овој предлог докторски проект е непостоењето на рамка што ги интегрира Lean принципите во процесот на дигитална трансформација. Повеќето пристапи се насочени кон имплементација на индивидуални софтверски решенија без целосно разбирање на дигиталната трансформација како холистички процес. Ова погрешно толкување

доведува до краткотрајни решенија, без долгорочни придобивки за ефикасноста и конкурентноста на компаниите. Дополнителен предизвик е тоа што ваквите рамки често не можат да обезбедат опишани придобивки за компаниите и истите често се занемаруваат, иако се многу важен дел при имплементацијата на дигиталните технологии.

Истражувањето е значајно бидејќи обезбедува практична и иновативна методологија за дигитална трансформација, која е директно прилагодена на потребите на индустријата, академската заедница и владините институции во Република Северна Македонија. За академската заедница, трудот дава дефиниции за главните поими поврзани со дигитална трансформација, нови погледи кон основните концепти на Lean менаџментот и хиерархијата на дигиталните системи, дава целосно нова рамка за имплементација, начин на мерење на успешноста на дигитална трансформација, како и дизајн на различни производствени сценарија имплементирани во лабораторија на универзитетот кои можат во иднина да се користат за влијателни истражувања. Овие резултати се значајни и за другите две инволвирани страни поради тоа што истражувањето ги адресира предизвиците поставени од нив и се очекува дека глобалниот тренд на многу слаба успешност на проектите за дигитална трансформација би се променил со примена на истите. Очекуваните резултати од оваа докторска дисертација се следните:

- развиена и успешно верификувана методологија за имплементација на дигитална трансформација во производствени компании базирана на Lean менаџмент
- покажување дека Lean менаџментот т.е. оптимизација на процесите е претходник на иницијативите за дигитална трансформација,
- дефинирана листа на дигитални технологии и предизвици за имплементација на дигитална трансформација,
- квалитативна компаративна анализа помеѓу главните поими поврзани со дисертацијата (Индустрија 4.0, Индустрија 5.0, дигитизација, дигитализација, дигитална трансформација итн.)
- дефинирани и документирани различни производни сценарија во различно ниво на оптимизација на процесите, дигитална култура, дигитален интензитет и дигитална вредност
- експериментално прикажување на влијанието на типот и бројот на дигиталните решенија на дигитална култура, дигитален интензитет и дигитална вредност.
- потврдување и/или отфрлање на сите и/или некои од главните работни хипотези.

Согласно принципот на дизајнирање на методологијата за дигитална трансформација преку земање во предвид на мислењата и потребите на претпријатијата (пошироката бизнис заедница), академската заедница и официјалните стратешки документи на Република Северна Македонија кои се однесуваат на оваа проблематика, се очекува дека резултатите добиени со оваа докторска дисертација да бидат применливи и корисни за горенаведените инволвирани страни (индустрија, академија и влада).

Во поглед на индустријата, самата методологија е лесно применлива и дава сеопфатен патоказ за имплементација на дигитална трансформација во производствените компании како и осигурување дека се работи за одржлива трансформација имплементирана на цврстите основи обезбедени од страна на Lean принципите. Дополнително, ги надоградува можностите на Smart Learning Factory - Skorje преку дизајнирање и тестирање на производни сценарија кои соодветно ќе бидат документирани и истите ќе бидат на располагање на факултетот и универзитетот за

користење во наставата, но и за апликативна дејност при изведба на практични обуки во лабораторијата.

Во поглед на академијата, дава нови концепти кога е во прашање интеракцијата на дигиталните технологии и Lean, ја дефинира листата на дигитални технологии според голем број на извори, дава сеопфатна анализа на предизвиците за имплементација на дигитална трансформација. За индустријата дава и дополнителна разработката на начините и показателите за мерење на успешноста на дигиталната трансформација, со посебен акцент на дигиталната вредност т.е. влијанието на дигиталните технологии на производните показатели. Дисертацијата дава нови гледишта и трансформација на традиционалните концепти на Куката на Lean и хиерархијата на дигитални системи (пирамида на автоматизација на процесите). Сценаријата и самата методологија имаат можност за реплицирање со многу мали измени во различни услови што ќе овозможи идни практични истражувања на различни дигитални технологии и притоа објавување на влијателни трудови.

Државата потенцијално може да ја користи оваа методологија за унапредување на дигиталната спремност на производствената индустрија, како да воспостави стандардизиран начин на водење и следење на успехот на проектите за дигитална трансформација, како во државните институции, така и за компаниите за кои обезбедува соодветни субвенции за имплементација на дигитални решенија.

1.4. Методологија и истражувачки прашања

Базирајќи се на стекнатото досегашно практично искуство и анализа на актуелната и релевантна литература, истражувањата во докторската дисертација ќе бидат насочени кон испитување на следниве научно-истражувачки хипотези:

- **Хипотеза 1:** Lean менаџмент служи како основа и претходник за дигитална трансформација, бидејќи неговите принципи за елиминација на загубите, алатките за оптимизација на процесите и културата на постојано подобрување ја воспоставуваат оперативната стабилност потребна за успешна интеграција и искористување на дигиталните технологии во производствените компании.
- **Хипотеза 2:** Методологијата за дигитална трансформација во производството, заснована на принципите на Lean менаџмент, ефикасно се справува со предизвиците и барањата за имплементација на дигитална трансформација, дефинирани од производствените компании и пошироката академска заедница, како и стратешките приоритети на државата.
- **Хипотеза 3:** Имплементацијата на дигитални решенија преку методологијата за дигитална трансформација, низ различни производствени сценарија, со различни нивоа на дигитализација, има позитивно влијание врз сеопфатните Lean показатели (дигитална вредност) во производството, дефинирани со стандардот ISO 22400-2, а истовремено ги подобрува показателите за дигиталната култура и дигиталниот интензитет во производствените средини.

Главните научно-истражувачки методи применети во докторскиот труд се: методот на преглед, акциско истражување, методот на анкета/прашалник, експериментален метод и статистичкиот метод. Деталите за примената на секој од овие методи се дадени во продолжение на оваа пријава.

Логиката на истражувањето е индуктивно-дедуктивна. При индуктивното расудување како почетна постапка во процесот на спознавање и истражување се оди од конкретното

кон општото, при што се почна со собирање на факти и податоци, од кои се извлекоа работните хипотези. Потоа, со дедуктивниот пристап движејќи се од општото кон конкретното ќе се тестираат хипотезите и ќе се донесат општи заклучоци врз основа на резултатите од експериментите, при што ќе се потврдат или отфрлат хипотезите.

Податоците се во најголем дел примарни, но поради природата на истражувањето и земањето во предвид на широк спектар на мислења од академската и бизнис заедницата, дел од анкетите, како и користените национални стратегии што се првично собрани со друга цел, но ќе бидат искористени во овој труд (секундарни податоци). Во сите приложени научно-истражувачки методи во продолжение, присутна е анализа и на квалитативни и на квантитативни податоци.

Метод на преглед (теоретски истражувања)

Ќе се направи детален преглед на научната и стручната литература во областа на дигиталната трансформација и нејзината примена во производствените компании. Ќе се пребараат базите на податоци со научни трудови (Google Scholar, Research Gate, Science Direct) и ќе се извлечат информации за трендовите во дигитализацијата на индустријата и нејзиното влијание врз продуктивноста. Ќе се разгледаат сите достапни технологии и стратегии за дигитална трансформација, како и најдобрите практики и методологии за интеграција на дигитални решенија во производствените процеси. Посебно внимание ќе се посвети на комбинирањето на Lean менаџментот со дигиталните технологии за постигнување синергетски ефекти и оптимални резултати. Детално ќе биде прегледан и разработен стандардот ISO 22400-2: Системи за автоматизација и интеграција - Клучни показатели за перформанси (KPIs) за управување со производствени операции, Дел 2: Дефиниции и описи.

Квалитативна компаративна анализа ќе се користи за споредба на термините како Индустрија 4.0, Индустрија 5.0, дигитална трансформација итн., и креирање на сеопфатни дефиниции за истите. Со помош на триангулација ќе биде направена анализа на рамката за имплементација на дигитална трансформација во однос на квалитативните податоци од прашалниците, литературата и националните стратегии и слични документи.

Прашалник

Со цел поголема сеопфатност и големата потреба од вклучување на инволвираните страни во дизајнот и верификацијата на рамката за дигитална трансформација (академија, индустрија и држава), дистрибуирани ќе бидат два главни прашалници врз кои ќе се донесат главните заклучоци, и тоа:

- прашалник за нивото на зрелост на производствените компании за имплементација на дигитални технологии,
- прашалник за испитување на влијанието на дигиталните технологии врз извршителите во производствениот процес.

Дополнително, прашалниците и резултатите за потребите на индустријата во Република Северна Македонија, дизајнирани и дистрибуирани за време на проектите Learn4SMEs, DigiTI-ME, CompetenSEE и AISkills4Lean ќе бидат земени во предвид при дизајнот на рамката за дигитална трансформација во производство, во вид на секундарни податоци.

Акциско истражување

Акциското истражување како стратегија се применува кога таргетираниот проблем идентификуван во претходните литературни истражувања се решава во консултација со повеќе инволвирани страни (бизнис заедницата, креаторите на политиките, државните институции итн.). Овој тип на истражување е соодветен за носењето на одлуки при дизајнирањето на рамката за имплементација на дигиталната трансформација поради земањето во предвид на повеќе инволвирани страни. Во конкретниот случај, прегледани се голем број на академски публикации кои ги разработуваат предизвиците во производствените компании кога е во прашање имплементација на дигитална трансформација, но при дизајнот на рамката, од големо значење е истата да се прилагоди и на предизвиците со кои се соочуваат и македонските производствени компании (податоци собрани преку прашалниците наведени во претходниот метод), како и креаторите на политиките односно стратешките и официјалните владини документи создадени во насока на унапредување на индустријата во земјава.

Експериментален метод

За истражување и докажување на поставените хипотези, покрај прашалниците и литературниот преглед, ќе се користи и опремата во Smart Learning Factory - Skopje, односно Лабораторијата за Индустриско инженерство и менаџмент. Согласно потребата од инволвирање на целиот производен процес во експериментот, целокупната опрема во лабораторијата ќе биде искористена во насока на создавање на различни производни сценарија кои ќе се одликуваат со различни Lean и дигитални карактеристики. Опремата вклучува:

- **рачни станици за монтажа** - монтажни станици кои може лесно да се трансформираат во станици со различен распоред, согласно потребите на производното сценарио,
- **рачни станици за складирање** - флексибилна станица за складирање чиј број на слободни места и кутии за складирање може да се промени согласно потребите на производственото сценарио,
- **супермаркет станица** - оваа станица претставува влезен логистички магацин со 24 независни линии, од кои секоја има тркалца кои се движат по шини, на кои се преместуваат 24 складишни кутии за складирање на неопходни компоненти за монтажа на различни типови производи. Целта на супермаркетот е да обезбеди непречен и навремен проток на компоненти во работниот процес и да обезбеди потребната количина на компоненти за Рока Јоке станицата. Супермаркетот е поставен на тркалца со кочници за полесна манипулација промена на распоредот на опремата при различните сценарија Секој линија на супермаркетот содржи оптички сензор за детекција на присуството на кутија на линијата (SICK W26), како и за квантитативно прикажување на бројот на празни и полни кутија кои се земени и поставени, прикажани на монитор. Kanban принципот е имплементиран на оваа станица и тоа обезбедува интегрирање на супермаркет станицата и Рока Јоке станицата. Кутиите се поставуваат на линијата од задната страна и по транспортер со тркала, доаѓаат на предвиденото место. За секоја линија е оставено место на предната страна за означување на линијата,
- **Smart Рока Јоке станица** - ова е концепт кој ги комбинира принципите на Рока Јоке со паметна технологија за креирање интелигентен процес за монтажа кој ги спречува грешките или дефектите да се појават за време на работата на

операторот. Оваа Smart Poka Yoke станица вклучува комбинација на хардвер, сензори и софтвер кои го водат операторот за време на монтажа на избраните производи. Главниот дел од конструкцијата е средишниот дел кој се состои од шест позиции за кутии за делови од производот опремени со ролери. Секоја кутија треба да содржи потребни делови за саканиот производ. Секоја позиција за кутија е исто така опремен со различен хардвер кој е носител на Poka Yoke концептот: копче, бројач, врата и светлосен сигнал. Станицата е опремена со „режим на учење“ - софтверско решение кое овозможува внесување на редоследот на склопување на потребниот производ,

- **транспортер** - транспортерот има функција на транспорт на производи од работната станица до роботската станица, при што се врши контрола на квалитетот според зададени параметри на камерата SICK Inspector PIM60, која е интегрален дел на камера за 2Д машинска визија (објаснето подолу). Една од компонентите интегрирани во транспортерот фреквентниот регулатор со кој се регулира и контролира брзината на движење на лентата на транспортерот. Дополнително, на горниот дел од транспортерот, поставен е енкодер SICK тип GTK08-OP-RA600B-2M кој ја бележи и испраќа податоци за брзината на движење на лентата која мора да биде синхронизирана со карактеристиките на камерата SICK Inspector PIM60. Транспортерот е флексибилен во однос на поставеноста во распоредот на производната опрема, притоа истиот може да се постави на различни позиции согласно потребите на производните сценарија,
- **камера за 2Д машинска визија** - целта на уредот 2D Machine Vision (2DMV) е да овозможи напредна визуелна контрола (континуирано следење) на производите од работната станица, сигнализирајќи ако производот не ги исполнува барањата за квалитет. **Сигнализирањето** (сина - системот е оперативен; зелено - добар производ; црвено - лош производ; звучен сигнал може да се активира ако производот не е добар) е обезбедено преку сигнално-звучен уред прикачен за конструкцијата. 2DMV се состои од интегриран компјутер со екран на допир и современа 2D камера тип SICK Inspector PIM60. Овој може да се интегрира со работата на транспортерот и SCARA роботот, но може да функционира и независно,
- **SCARA робот** - роботската станица SCARA претставува роботска станица со индустриски Mitiubishi Electric Scara робот тип RH-3CRH401-8-D-S15. SCARA роботот се наоѓа во простор направен од алуминиумска конструкција и плексиглас. Постојат два врати (предна и задна) преку кои е можно да се пристапи до внатрешниот простор на роботот. Вратите се обезбедени со еден безбедносен механички прекинувач тип SICK i12, кој обезбедува дека процесот ќе се запре ако вратите на роботот се отворени без овластување. И овој модул е флексибилен во однос на својата локација и може да се постави на различни локации во производниот процес. SCARA роботот е интегриран со камерата за 2Д машинска визија, која испраќа сигнал до роботот согласно квалитетот на делот кој го проверува. Базирано на ваквата информација, SCARA роботот со помош на вакуум го зема делот и го поставува на палета за делови кои го задоволуваат квалитетот или делови кои не го задоволуваат квалитетот,
- **Апликација LMF-SUPERMARKET** - апликацијата се состои од екран со 24 полиња (во матрица 6x4) кои означуваат 24 линии на супермаркетот. Секое поле е во горниот лев дел на полето нумерирано од 1 до 24. Црвените полиња означуваат кога кутијата не се наоѓа на одредената линија, додека зелените полиња означуваат кога кутиите се на одредената позиција. При почеток на апликацијата,

почетните вредности на линиите ќе бидат нула. Кога кутијата ќе се помести од линијата така што сензорот ќе ја детектира дека е земена, на екранот вредноста ќе се зголеми за 1 и ќе се појави црвено поле, додека не се постави следната кутија на истото место. Апликацијата служи за подобар визуелен менаџмент за снабденоста со материјали на супермаркетот.

Во производните сценарија, како пропратни системи се користат и апликациите за пријавување и менаџмент на барања за одржување, енергетски менаџмент, решавање на проблеми во производството и ERP систем за планирање и управување на производството.

Со цел симулирање на реалните сценарија во производниот процес, воведен ќе биде специјален производ од најмалку шест делови за монтажа. Ќе биде изработени упатство за монтажа согласно дефинираните сценарија. Доколку се користи различен производ за изведба на некои од сценаријата поради техничките ограничувања на лабораторијата, производните показатели ќе бидат коригирани со помош на коефициент на сличност на производите. При секое мерење на извршителите, ќе се проценува коефициент на залагање на извршителот со цел дополнително да се коригираат измерените показатели.

Верификација на рамката за дигитална трансформација

Преку преглед на литературата и портфолио анализа, избран ќе биде најсоодветен метод за верификација на методологијата за дигитална трансформација со цел да се потврди дека истата ги исполнува барањата наведени во работните хипотези и се издвојува од постоечките рамки за дигитална трансформација.

Математички метод - статистичка анализа

За статистичка анализа на експерименталните податоци ќе се користи софтверскиот пакет Microsoft Excel. Софтверот ќе овозможи да се организираат и структурираат податоците добиени за време на мерењата при студиите на случаи и експериментите низ сите сценарија, вклучувајќи ги податоците за Lean показателите и показателите за успешност на дигиталната трансформација. Оптимизација и визуелизацијата на податоците ќе биде изработена во софтверскиот пакет Microsoft PowerBI. Овој софтверски пакет овозможува следење на резултатите во реално време, притоа извештаите од истиот може потенцијално да се користат и како дигитални информативни табли во производството. Анализата на добиените одговори ќе биде направена согласно типот на индикаторот кој се разгледува, а како што е дефинирано во самиот ИСО стандард (поголемо-подобро, помало-подобро, номинално-најдобро и сл.).

1.5. Кус преглед на дисертацијата

Дисертацијата се фокусира на анализирање и систематизирање на процесот на дигитална трансформација во производството, со посебен акцент на интеграцијата на дигиталните технологии со Lean менаџмент принципите. Во второто поглавје се обработува технолошката револуција преку дефинирање и споредба на Индустрија 4.0 и Индустрија 5.0, преглед на дигиталните технологии, како и нивните принципи и цели. Овој дел обезбедува теоретска основа за разбирање на контекстот во кој се одвива дигиталната трансформација.

Во третото поглавје, дигиталната трансформација се разгледува конкретно во производствен контекст, при што се дефинираат нејзините слоеви и нивната улога во организацијата. Посебно внимание е посветено на Lean менаџментот, вклучувајќи ги Lean принципите, загубите и алатките, како и на врската помеѓу Lean и дигиталните технологии. Овој дел ја поставува основата за потребата од структурирана рамка која ќе овозможи усогласена и одржлива имплементација на дигитални решенија.

Централниот придонес на дисертацијата е претставен во четвртото поглавје, каде се развива рамка за имплементација на дигитална трансформација во производството. Рамката е структурирана преку фази на концептирање, структурирање, евалуирање и документирање. Во рамките на овие фази се дефинираат потребите и проблемите, целите, барањата и соодветните решенија, како и нивната интеграција во кохерентен и логички поврзан систем. Рамката има изразен оперативен карактер, насочен кон практична примена, и служи како водич за систематско планирање и имплементација на дигитални иницијативи во производствени организации.

Во петтото поглавје, рамката е верифицирана преку студии на случај реализирани во Smart Learning Factory - Скопје. Прво се даваат основни информации за истражувањето и опкружувањето, по што следи поврзување на рамката со конкретни сценарија на дигитална трансформација. Прикажани се резултатите од експериментите преку сет на показатели за дигитална вредност, дигитална култура, дигитален интензитет и дигитална зрелост, како и анализа на нивното заемно влијание. Овој дел обезбедува емпириска потврда за применливоста и корисноста на предложената рамка во реален производствен контекст.

Дисертацијата завршува со заклучоци кои ги сумираат клучните наоди, придонесот на истражувањето и можностите за понатамошна примена и надградба на рамката во различни индустриски сектори.

2. ТЕХНОЛОШКА РЕВОЛУЦИЈА

Во ова поглавје се презентира преглед на литературата поврзана со технолошката револуција. Најнапред сè дефинира поимот Индустрија 4.0 преку технологиите (овозможувачи), принципите (обликувачи) и целите (оправдувачи). Посебен фокус се става на дигиталните технологии кои ја овозможуваат Индустрија 4.0, преку систематска идентификација на клучните дигитални технологии, создавајќи конечна листа на дигитални технологии, во согласност со литературата.

2.1. Дефинирање на Индустрија 4.0

Индустријската револуција започнала во почетокот на 1800-тите со преминот од земјоделски кон индустриски општества, поттикнат од парните машини и употребата на јаглен и вода. Кон крајот на 1800-тите се појавува втората индустриска револуција, обележана со механизација и технолошки напредок. Третата индустриска револуција започнува на почетокот на седумдесеттите години од минатиот век со појава на транзисторите, микропроцесорите и ARPANET (претходниот на интернетот), овозможувајќи компјутеризација на производството [36], [37].

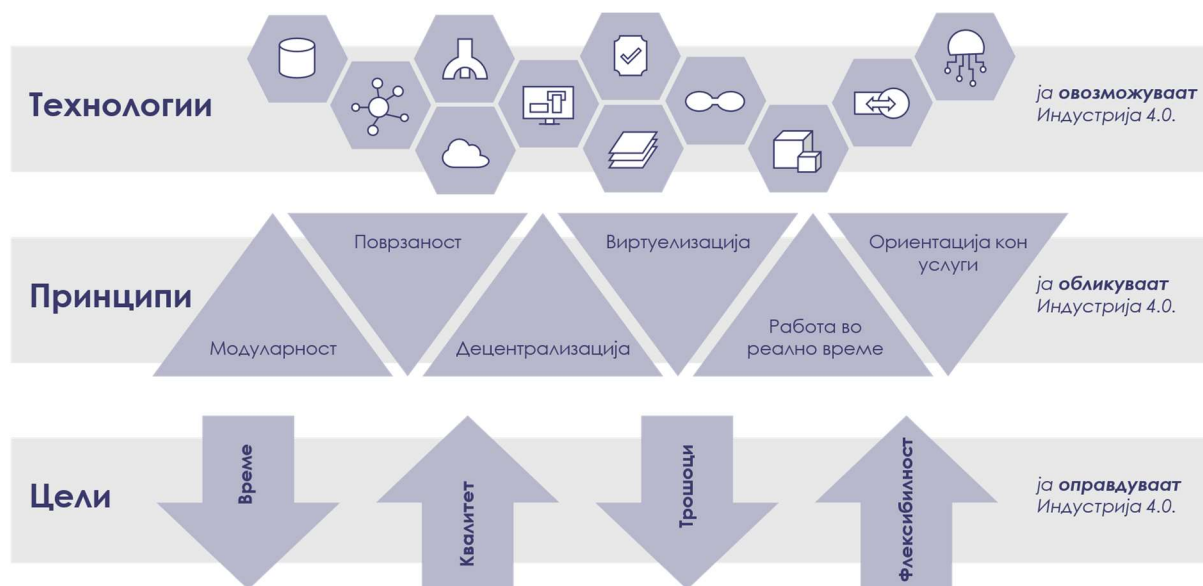
Во последните две децении, се смета дека се наоѓаме во четвртата индустриска револуција или во литературата позната како Индустрија 4.0. Паралелно од страна на футуристите се развива и концептот за Индустрија 5.0. Нивното разграничување не е ниту малку лесно како помеѓу првите три револуции, па затоа некои научници го заменуваат терминот Индустрија 5.0 со сајбер-физички производни системи ориентирани кон човекот [38]. Илустрација за зголемувањето на комплексноста (од аспект на користените технологии) на индустриските револуции и проценка за времето на започнување на истите е дадено на Слика 2.1, прилагодена според [36].



Слика 2.1 Индустриски револуции

Наједноставно, според Слика 2.1, Индустрија 4.0 може да се разгледува како четврта фаза, временски период, во историскиот развој на технологијата, обележана со интензивна примена на комплексни дигитални технологии. Сепак, во литературата на Индустрија 4.0 и се препишуваат и други дефиниции, па истата добива многу поширок социо-технички карактер [39]. Поради ова, во продолжение ќе биде направен обид за дефинирање на Индустрија 4.0 од повеќе различни аспекти, и тоа преку нејзините:

- технологии → кои ја овозможуваат (“enablers”) [40],
- принципи → кои ја обликуваат (“shapers”) [41], и
- придобивки → кои ја оправдуваат / (“justifiers”) [42].



Слика 2.2 Концепт за дефинирање на Индустрија 4.0

Слика 2.2 дава визуелен приказ рамката која ќе се користи за дефинирање на Индустрија 4.0 преку овозможувачите, обликувачите и оправдувачите на Индустрија 4.0 (симболично наречени **трио на Индустрија 4.0**).

2.1.1. Дигитални технологии на Индустрија 4.0

Дигиталната технологија опфаќа збир на технички средства и процеси кои се фокусирани на дигитална обработка на податоци. Дигиталните технологии се потпираат на современи компјутерски системи кои прецизно ги претвораат сложените, разновидни и менливите податоци од реалниот свет (како што се текст, слики, звуци и видеа) во дискретни дигитални сигнали. Овие дигитални сигнали можат да се обработуваат, складираат и пренесуваат со голема брзина и со голема прецизност во рамките на компјутерот, овозможувајќи ефикасна обработка и користење на истите.

Најголемиот дел од научните трудови поврзани со Индустрија 4.0 даваат листа на дигитални технологии на Индустрија 4.0, но мора да се забележи технологиите на овие листи често се различни, при што некои автори додаваат технологии, а други исфрлаат од листата, користат различни имиња за нивно опишување итн.

Со цел да се дојде до една сеопфатна листа на дигиталните технологии на Индустрија 4.0, направен е литературен преглед на научни трудови на оваа тема, при што во Табела 2.1. дадени се изворите и технологиите кои истите ги застапуваат.

Табела 2.1 Преглед на литературата за листата на дигитални технологии

Технологија	[43]	[44]	[45]	[46]	[47]	[48]	[49]	[50]	[51]	[52]	[53]	[54]	[55]	[56]	[57]
Големи податоци и аналитика	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Интернет на нештата	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Автономни работи	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Облак	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Адитивно производство	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Проширена реалност	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Технологија	[43]	[44]	[45]	[46]	[47]	[48]	[49]	[50]	[51]	[52]	[53]	[54]	[55]	[56]	[57]
Системска интеграција	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓	
Сајбер безбедност	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓
Симулации	✓	✓	✓	✓	✓			✓		✓		✓	✓	✓	
Вештачка интелигенција					✓	✓							✓	✓	✓
Сајбер-физички системи						✓	✓		✓						✓
Паметна фабрика							✓		✓						
Индустриска автоматика														✓	
5G мрежа					✓										
Паметни производи							✓								
Машина-кон-машина															✓
Мобилни технологии															✓

Во Табела 2.2 дадена е анализа на процентуалната застапеност на технологиите во литературата. Во табелата дадени се само технологиите застапени во над 30% од литературните извори, согласно анализата во **Табела 2.2**.

Табела 2.2 Најзастапени технологии на И4.0 во литературата

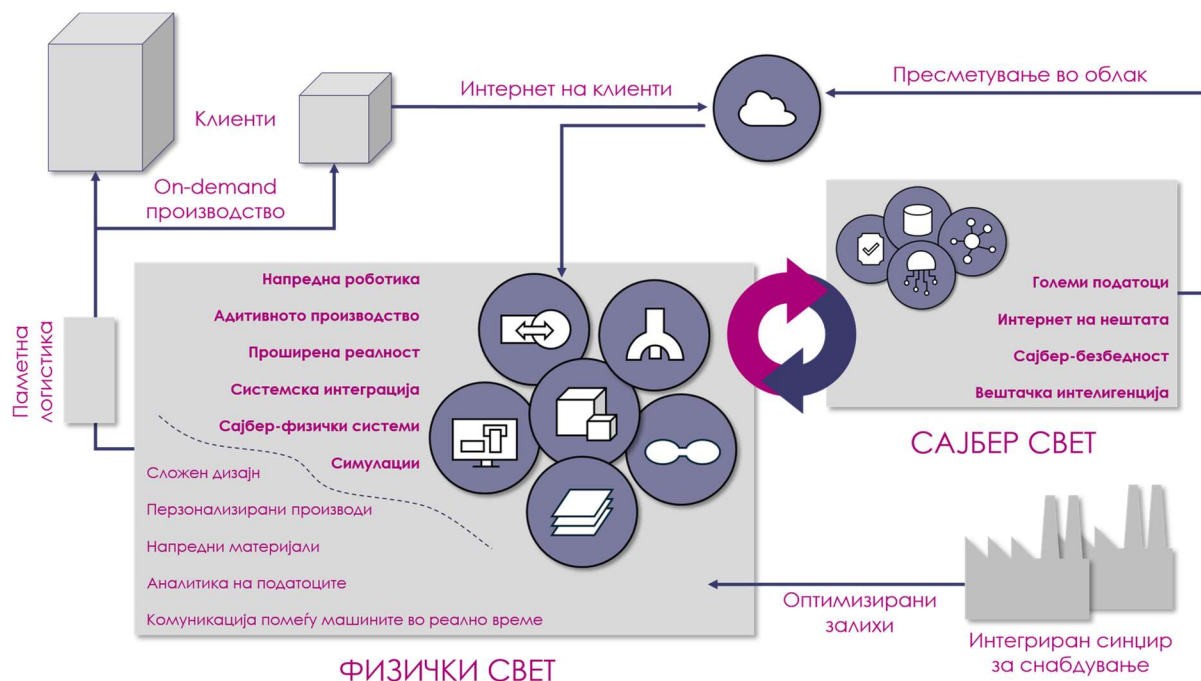
Р.Б.	Технологија	Алтернативни имиња во литературата	%
1	Големи податоци и аналитика	Големи податоци, напредна аналитика	100%
2	Интернет на нештата	Индустриски интернет на нештата,	100%
3	Автономни роботи	Автономни системи, интелигентни роботи, роботика	94%
4	Облак	Префрлање на облак, складирање на податоци	94%
5	Адитивно производство	3Д печатење	94%
6	Проширена реалност	Аугментирана реалност, виртуелна реалност	88%
7	Системска интеграција	Вертикална и хоризонтална интеграција	75%
8	Сајбер-безбедност	Кибер-безбедност	71%
9	Симулации	Дигитален близнак, Симулација на деловни процеси	69%
10	Вештачка интелигенција	Когнитивна информатичка обработка	31%
11	Сајбер-физички системи	Сензори и актуатори, RFID технологии	31%

Иако листата со технологии во Табела 2.2 ги опфаќа доминантните технолошки компоненти на Индустрија 4.0, потребно е да се истакне дека не сите наведени технологии претставуваат независни и строго раздвоени категории. Имено, одредени технологии имаат и хиерархиски односи. На пример, вештачката интелигенција, во случај кога не се разгледува самостојно како технологија, во литературата најчесто се појавува како составен дел на големите податоци и напредната аналитика [58]. Слично на тоа, сајбер-физичките системи често се разгледуваат како интегративен концепт што ги обединува сензорите, актуаторите и комуникациските технологии, правејќи ја основа за имплементација на останати технологии, како на пример интернет на нештата [59]. Понатаму, резултатите од Табела 2.2 може да ги анализираме во три групи:

- големи податоци и аналитика, интернет на нештата, облак, автономните роботи и адитивно производство доминираат во литературата и се присутни во над 90% од прегледаните извори. Ова е затоа што тие претставуваат фундаментални градбени блокови на Индустрија 4.0 - создавање, собирање и обработка на податоци, поврзување на уреди и автоматизација на процеси. Кај овие технологии може да се забележи дека се во суштина технологиите кои се најзрели (се користат веќе долго време и се развиени на највисоко ниво).

- во втората група може да се сместат проширената реалност, сајбер-безбедност, системска интеграција и симулациите. Тука може да се забележи дека се работи за технологии кои повеќе служат за поддршка на И4.0 системите како на пример, визуелизација, поврзување и безбедност.
- третата група со релативно мала застапеност во литературата, во контекст на технологии на Индустрија 4.0 се вештачката интелигенција и сајбер-физичките системи. За овие две технологии веќе е споменато погоре во текстот и сосем е логично да истите бидат со мала индивидуална застапеност во ваков тип на преглед на литературата. Додека одредени автори ја наведуваат вештачката интелигенција како посебна технологија, сепак таа првично е дел од технологијата на големи податоци и аналитика, а сајбер-физичките системи, генерално се присутни во најголем дел од горенаведените технологии поради тоа што тие се овозможувачи на истите (најизразена е врската со интернет на нештата, или со адитивното производство каде, на пример, еден 3Д печатач претставува сајбер-физички систем).

Комбинацијата на овие дигитални технологии е основа за паметна фабрика. Ова значи дека технологиите во идеален случај треба да функционираат во интегриран екосистем. На Слика 2.3 го даден е екосистемот на Индустрија 4.0, прилагоден според [60].



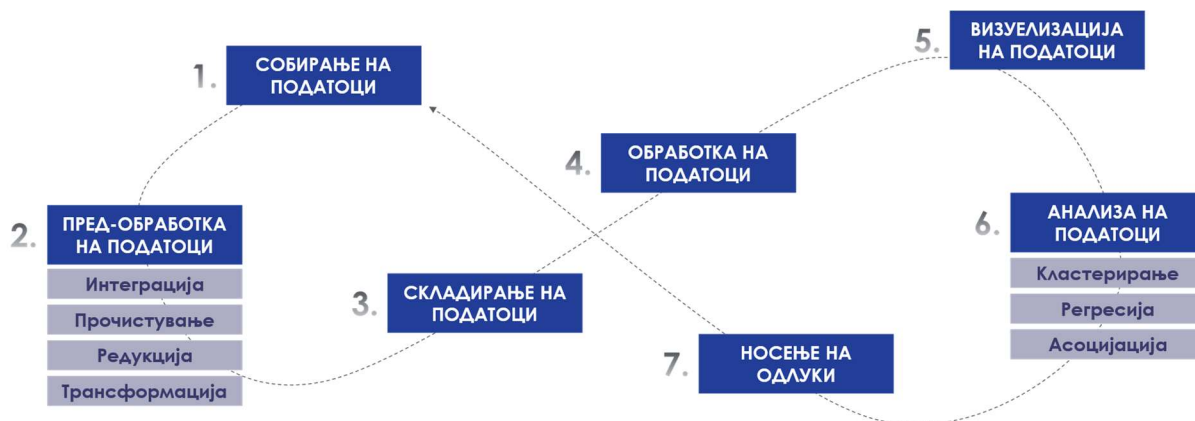
Слика 2.3 Екосистем на Индустрија 4.0

Екосистемот на Индустрија 4.0 се темели на интеграција на виртуелната (сајбер) и физичката димензија на производството. Во виртуелниот дел спаѓаат технологиите за собирање, обработка и анализа на податоци, како што се интернетот на нештата, големите податоци и облакот. Овие технологии обезбедуваат континуирана размена и анализа на податоци, што овозможува подобра координација, оптимизација и донесување на одлуки. Од друга страна, физичкиот дел го опфаќа современото производство преку автономни работи и адитивно производство, кои овозможуваат флексибилност, персонализација и повисок квалитет на производите. Преку соработка меѓу сајбер и физичкиот свет, се рedefинира и улогата на човекот, кој станува интегрален дел од дигитално потпомогнатиот производствен систем.

Во продолжение ќе бидат дадени кратки дефиниции, визуелизации и примена на дигиталните технологии издвоени со прегледот на литературата во Табела 2.2.

Големи податоци и аналитика

Технологијата на големи податоци и аналитика се однесуваат на екстремно големи, разновидни и брзорастечки множества од податоци кои се премногу сложени за обработка од страна на традиционалниот софтвер. Големите податоци опфаќаат структурирани (бази на податоци, табели), неструктурирани (текст, аудио, видео) и полуструктурирани податоци од извори (како на пример податоци собрани од сензори или социјални медиуми). Вообичаено технологијата на големи податоци е проследена со аналитика, што се однесува на употреба на дигитални алатки и системи кои можат брзо да извлечат информации од големите податоци [61]. Концептуална рамка со основните чекори на функционирање на технологијата на големи податоци и аналитика е дадена на Слика 2.4, прилагодена според [62].



Слика 2.4 Рамка на функционирање на големи податоци и аналитика

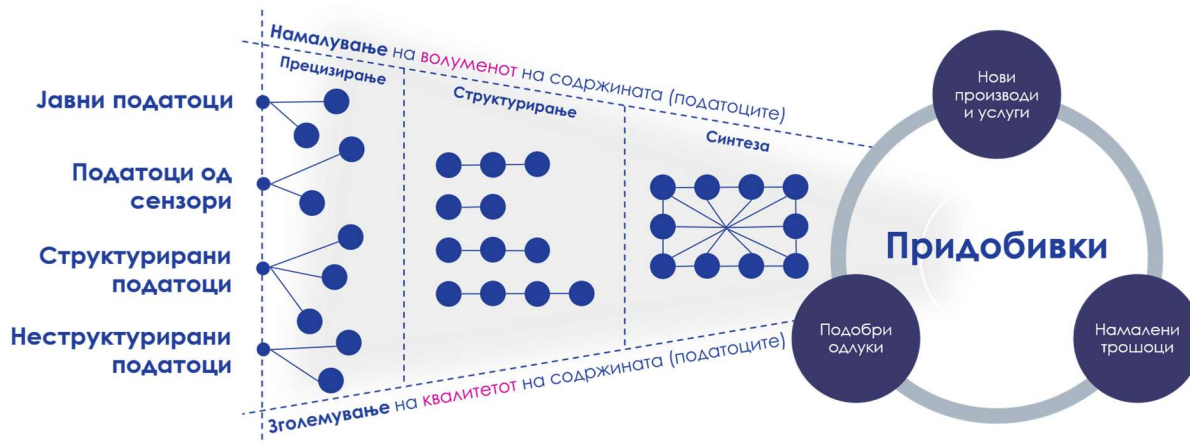
Големите податоци имаат пет главни карактеристики, во литературата наречени 5V на големите податоци (според првата буква од карактеристиката на англиски јазик) [63]:

- обем („volume“) - огромна количина на податоци од производните системи,
- брзина (“velocity”) - податоците се создаваат и анализираат во реално време,
- разновидност (“variety”) - податоци од различни формати (текст, слика, сигнал),
- веродостојност (“veracity”) - важноста на точноста и квалитетот на податоците, и
- вредност (“value”) - вистинската корист доаѓа преку анализа што создава вредност.

Други извори додаваат и уште 5V како карактеристики на големите податоци, и тоа валидност (“validity”), одржливост (“viability”), нестабилност (“volatility”), ранливост (“vulnerability”) и визуелизација (“visualization”) [64].

Во производството, технологијата на големи податоци овозможува носење одлуки базирани на податоци во реално време. Податоците се генерираат од машини и процеси преку сензори и индустриски уреди и се анализираат за подобро следење на системите. На тој начин се овозможува рано откривање на проблеми, оптимизација на процесите и подобрување на перформансите. Најчести примени се превентивно одржување, поддршка во дизајнот, автоматизирано управување со производството и подобрување на транспарентноста и ефикасноста на синџирот на снабдување [65].

На Слика 2.5 е прикажан концептот на инка на големите податоци, каде што од различни извори се собираат голем број податоци. Преку процеси на прочистување, структурирање и синтеза, обемот се намалува, а квалитетот и вредноста на податоците се зголемуваат. Како резултат на тоа се добиваат конкретни придобивки, како подобри одлуки, намалени трошоци и развој на нови производи и услуги [66].



Слика 2.5 Инка на големите податоци и аналитика

Генерално податоците, но и големите податоци стануваат и **стратешки ресурс**, односно претпријатијата што располагаат со многу податоци стекнуваат предност пред конкурентите, бидејќи можат побрзо да иновираат, попрецизно да предвидуваат и подобро да ги насочуваат своите услуги[67]. Ова се објаснува преку визуелизацијата дадена на Слика 2.6.



Слика 2.6 Визуелизација на односот на податоците и компаниската стратегија

Според сликата, врз основа на стратегиите на претпријатието се дефинираат клучните показатели за мерење на успешноста на бизнисот. Мерењето на успешноста бара сопирање на податоци со цел мерење на соодветните показатели кои служат како основа за подобрување и прилагодување на стратегијата, создавајќи континуиран циклус на подобрување, развој и учење [68], [69]. Позитивното влијание на големите податоци произлегува од принципот дека поголемата достапност на податоци овозможува носење на поквалитетни одлуки. Подобрите одлуки водат кон подобрување на производите и услугите. Во одредени случаи, овој ефект се проширува, при што подобрените производи привлекуваат повеќе клиенти/корисници, а зголемениот број корисници генерира дополнителни податоци за нивните потреби и искуства, што овозможува понатамошно унапредување на стратегиите.

Интернет на нештата

Терминот интернет на нештата претставува мрежа од меѓусебно поврзани „паметни“ објекти кои преку интернет собираат, обработуваат и разменуваат податоци. Интернетот на нештата овозможува физички објекти (на пр. сензори) да „комуницираат“ меѓусебно и да споделуваат информации преку интернет [70]. Со тоа се создава паметна околина: паметни уреди, паметни домови, паметни фабрики и паметни градови. Генерална рамка за начинот на функционирањето на Интернет на нештата дадена е на Слика 2.7, адаптирана според [71].



Слика 2.7 Рамка на функционирање на интернет на нештата

Според [70], имплементацијата на IoT во производствениот сектор овозможува дигитализација и поврзување на производните активности во единствен систем, со размена на податоци во реално време и поддршка на аналитичко донесување одлуки. Преку висококвалитетни и точни податоци се постигнува севкупно унапредување на процесите и производите. Интернет на нештата придонесува за автоматизација, далечинско следење на производството и предиктивно одржување, со што се намалуваат неочекуваните застои, трошоците и потрошувачката на енергија. Дополнително, се подобрува безбедноста на работното место преку следење на состојбата на опремата и вработените, како и транспарентноста на синџирот на снабдување, што овозможува подобро планирање и побрза реакција на барањата од пазарот. Техничката архитектура на интернет на нештата се состои од слоеви [72], [73]:

- **физички слој (“things”)** - има за цел да ги идентификува појавите во околината и да собира податоци од реалниот свет (пр. сензори),
- **мрежен слој** - кој овозможува пренос на податоците собрани од физичкиот слој кон други поврзани уреди за обработка и складирање на податоците, користејќи различни комуникациски технологии (пр. интернет инфраструктура),
- **слој за обработка на податоците** - овој слој ги анализира податоците добиени преку интернет и, по потреба, ги складира податоците и резултатите од анализата на облак,

- **апликативен слој** - ги претставува резултатите од обработката на податоците преку кориснички интерфејси или апликации, овозможувајќи практична примена на системите потпомогнати од интернет на нештата

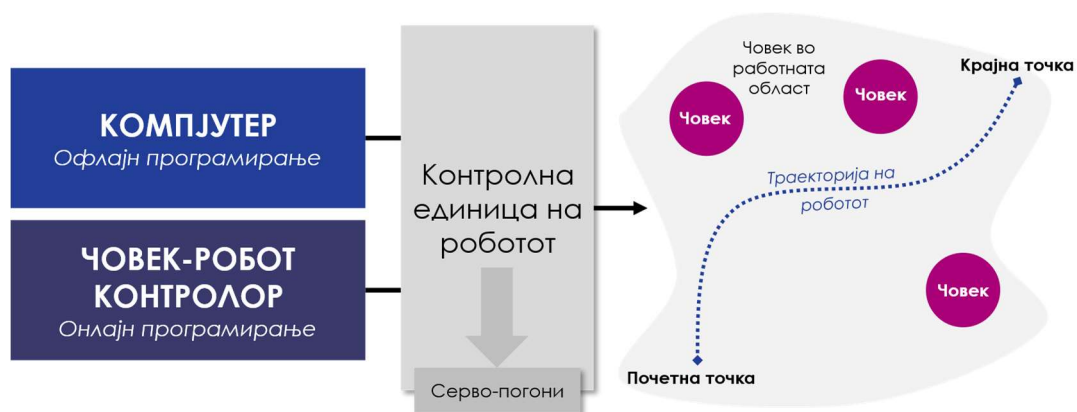
Тука мора да се напомене дека интернетот на нештата во себе интегрира повеќе технологии на Индустрија 4.0. Најпрво податоците се основниот ресурс со кој истиот функционира (технологија на големи податоци и аналитика). Овие податоци потенцијално треба да бидат складирани на облак, а собрани да бидат со помош на одреден сајбер-физички системи.

Напредна роботика

Роботите претставуваат електромеханички системи дизајнирани за извршување на однапред дефинирани задачи, при што нивната примена во производството значително придонесува за зголемена продуктивност, ефикасност и квалитет. Поради нивната способност за континуирана работа, висока прецизност и издржливост, роботите сè почесто ги заменуваат или надополнуваат човечките оператори, особено во физички напорни, повторливи и ризични задачи. Во Индустрија 4.0 дополнително се трансформира улогата на роботиката преку зголемена поврзаност, интелигенција и интеграција со дигитални технологии, при што се поттикнува соработката човек-робот [74], [75]. Во најширока смисла, се разликуваат следните типови на работи во производството:

- индустриски работи [76] - големи, фиксни, високо прецизни, користени за масовно производство.
- колаборативни работи (коботи) [77] - помали, безбедни и флексибилни, дизајнирани за работа заедно со луѓето.
- автономни мобилни работи [78] - се движат самостојно низ фабриката, вршат транспорт на материјали и производи.

Генеричка шема за работа на еден робот заедно со човекот во неговата околина е дадена на Слика 2.8, сопствена интерпретација според [79], [80].

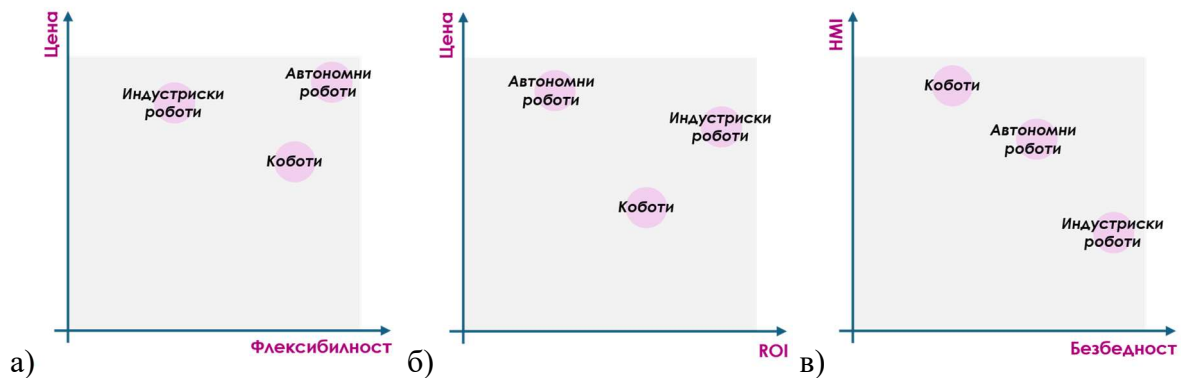


Слика 2.8 Генеричка шема на функционирање на робот

Програмата се внесува преку компјутер (офлајн програмирање) или преку т.н. „teach pendant“ (онлајн програмирање). Во контролниот кабинет, командите се обработуваат (планирање на траекторија и декодирање), по што сигналите се испраќаат до серво-погоните кои ги движат моторите на роботот од почетната до крајната точка, земајќи го во предвид човекот кој се наоѓа во работната област заедно со роботот.

Во контекст на Индустрија 4.0, роботиката е составен дел екосистемот на паметна фабрика, при што роботските системи најчесто се интегрираат со други технологии, како на пример сензори, вештачка интелигенција, дигитални близнаци итн.

Трите општи групи на работи, кои во најголем случај можат да ги извршуваат истите активности, сепак се разликуваат по одредени критериуми, па одлуката за избор на одреден тип вообичаено паѓа при оцена врз основа на повеќе критериуми. На Слика 2.9, преку портфолио матрици, дадени се неколку споредби на типовите на работи по различни критериуми.



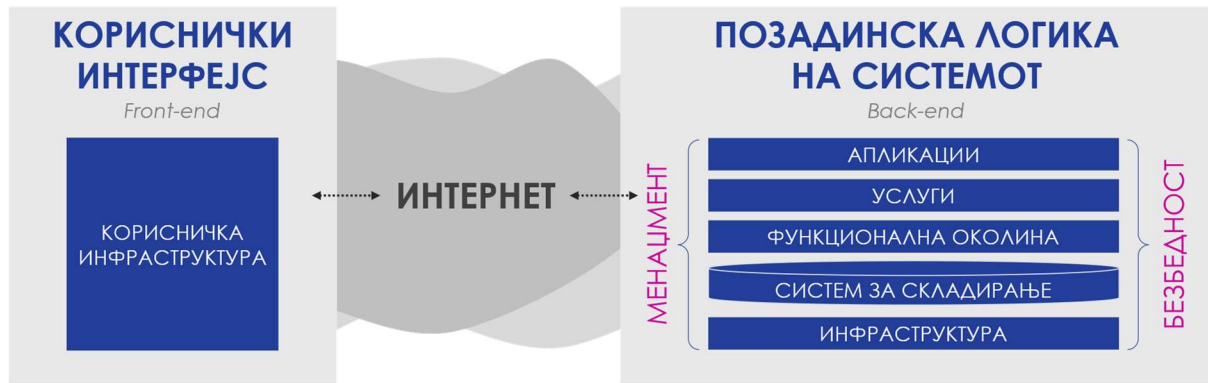
Слика 2.9 Споредба на типовите на работи според критериуми

Доколку се анализира матрицата под а), може да се забележи дека цената е највисока кај автономните работи, но исто така тие располагаат и со висока флексибилност. За разлика од нив, индустриските работи, иако имаат помала цена, нивната флексибилност е ограничена. Коботите од аспект на флексибилност се малку послаби во споредба со автономните работи, но имаат најниска цена во споредба со сите три други концепти.

Облак

Облак претставува технологија која овозможува обезбедување на компјутерски ресурси и услуги преку интернет, со што значително се менува традиционалниот модел на информатичка инфраструктура. Наместо локално хардверско и софтверско опремување, пресметковна моќ, просторот за складирање и мрежните услуги се централизирани во оддалечени центри за податоци управувани од специјализирани даватели на услуги. Основата на облакот е виртуелизацијата на ресурсите и нивното обезбедување по потреба [81]. Архитектурата на технологијата се состои од кориснички интерфејс (front-end), преку кој корисниците пристапуваат до услугите, и серверски дел или позадинска логика на системот (back-end), кој ги опфаќа апликациите, услугите и инфраструктурата што ги обработуваат барањата. Притоа, безбедноста и управливоста имаат клучна улога во обезбедување сигурен, доверлив и ефикасен пристап до податоците и ресурсите [82]. Архитектурата на облакот прикажана на Слика 2.10 е адаптирана според [83].

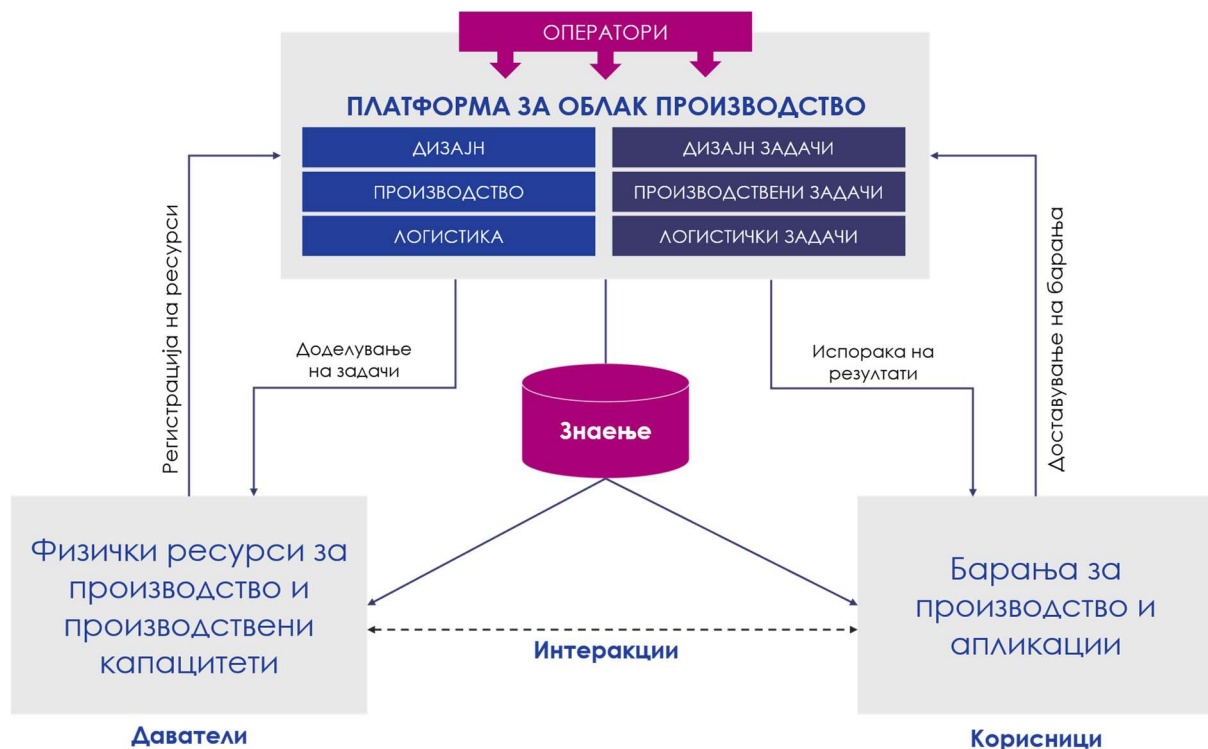
Корисникот пристапува преку интерфејс („front-end“), додека обработката и складирањето на податоците се извршуваат во позадинска логика на облакот („back-end“) Комуникацијата се одвива преку интернет, а менаџментот и безбедноста обезбедуваат контрола, заштита и стабилност на услугите.



Слика 2.10 Рамка на функционирање на технологијата на преместување на облак

Постојат три основни форми на облак-услуги: јавен, приватен и хибриден облак. Јавниот облак го нудат посебни даватели на услуги како услуга за многу корисници. Приватниот облак го гради и користи само едно претпријатие за свои внатрешни потреби. Хибридниот облак е комбинација од двата - компанијата може дел од помалку чувствителните процеси да ги стави во јавниот облак, а податоците и апликациите со висока безбедност да ги чува во приватниот облак [84].

Според [85], технологијата на облак овозможува оптимизација на процесите, намалување на трошоците и континуитет на производството, но истовремено наметнува предизвици поврзани со безбедноста, приватноста на податоците, усогласеноста со регулативи и зависноста од надворешни даватели на услуги. Слика 2.11 дава приказ на оперативен модел на облак-производство, прилагодена според [86].



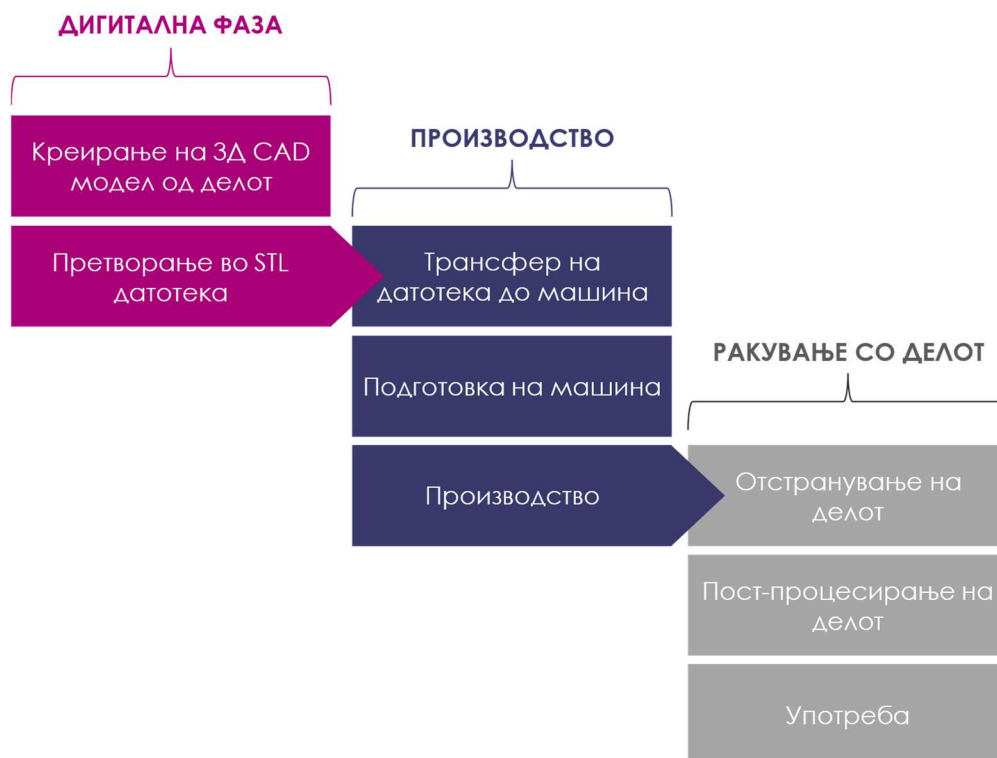
Слика 2.11 Оперативен модел на облак-производство

Облак-производство претставува централизирана облак платформа која ги поврзува операторите, производствените задачи (дизајн, производство, логистика) и физичките ресурси во единствен систем. Преку споделена база на знаење, платформата овозможува

усогласување на производствените капацитети со барањата на корисниците и координирана реализација на задачите.

Адитивно производство

Адитивното производство е напредна технологија што се користи за производство на делови со сложена геометрија и структури со додавање материјал во форма на слоеви, користејќи податоци од 3D модел. Адитивното производство е познато под повеќе имиња, вклучувајќи брзо прототипирање и 3D печатење. Постојат различни техники на адитивно производство како што се: стерео литографија (SLA), дигитална обработка на светлина (DLP), селективно ласерско синтерување (SLS), топење со електронски зрак (EBM), моделирање со фузиско депонирање (FDM), мулти џет/полиџет 3D печатење, селективно ласерско топење (SLM) и производство на ламинирани објекти (LOM) и други [87]. Овие техники користат различни материјали, како керамика, пластика, метал, течности, прав или живи клетки. Врз основа на 3D модел, тие овозможуваат изработка на сложени 3D компоненти со форми што често не се изводливи со традиционалните производствени техники [88]. Според истиот извор, на Слика 2.11 дадена е генерална рамка за изведување на процесот на адитивно производство.



Слика 2.12 Процес на адитивно производство

Во контекст на Индустрија 4.0, адитивното производство претставува клучна технологија што ја поддржува сајбер-физичката интеграција и развојот на паметни фабрики способни за високо ефикасно производство на персонализирани и сложени производи. Индустрија 4.0 ја проширува примената на адитивното производство преку употреба на напредни материјали, процесите и дизајни, овозможувајќи изработка на функционални компоненти во оптимизиран број на чекори и за кратки времиња. Ова придонесува за децентрализирано и флексибилно производство и максимизирана персонализација [89].

Проширена реалност

Проширената реалност претставува збир на дигитални технологии кои го поврзуваат физичкиот и виртуелниот свет и ги опфаќаат виртуелната реалност (VR), зголемената реалност (AR) и мешаната реалност (MR). Основната карактеристика на XR е можноста за надградување на реалната средина со дополнителен слој на податоци и информации, со што се подобрува перцепцијата, разбирањето и донесувањето одлуки. Во последните децении, технологиите за проширена реалност стануваат сè почесто применувани во работната практика на производствените претпријатија, иако нивната најпопуларна примена е за забава. Според [90], [91], забележан е значителен пораст на инвестициите во концептите на проширена во производството. Технологиите на проширена реалност е дадени на Слика 2.13.



Слика 2.13 Технологии на проширена реалност

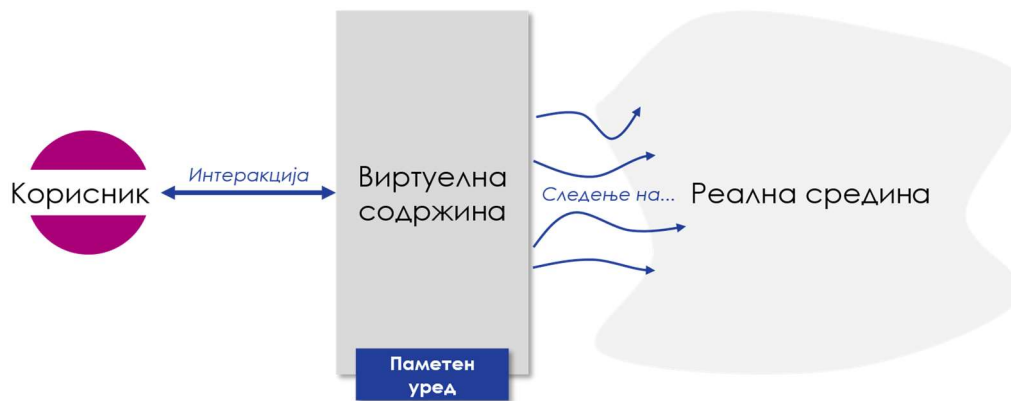
Проширената реалност се состои од три засебни области:

- **аугментирана реалност** - е технологија која во реално време ја надградува физичката средина со контекстуално поврзани дигитални информации, подобрувајќи ја перцепцијата на реалноста без нејзино целосно заменување [92].
- **виртуелна реалност** - претставува напреден интерфејс човек-компјутер кој создава целосно симулирана, интерактивна средина во која корисникот може да се движи и да комуницира со виртуелни објекти [93].
- **комбинирана реалност** - опфаќа спектар на технологии кои комбинираат реални и виртуелни елементи, овозможувајќи нивна коегзистенција и интеракција во заедничка средина, при што границата помеѓу AR и VR е постепена и контекстуално зависна [94].

Аугментираната реалност најчесто се вбројува како една од технологиите на Индустрија 4.0 како засебна технологија. Аугментираната реалност претставува интеграција на дигитални информации во реалната средина, со што се подобрува перцепцијата и разбирањето на реалноста. Преку интерактивни содржини, аугментираната реалност го олеснува учењето, ги поедноставува сложените концепти за монтажа и одржување на опрема и ја зголемува ангажираноста на корисниците [92]. Оваа технологија претставува технологија која во реално време ја надградува физичката средина со компјутерски генерирани информации (во вид на слики, текст или друг тип на графика), со што се подобрува перцепцијата на корисникот без да се заменува реалниот свет со целосно

виртуелна слика (што е случај кај виртуелната реалност). Со напредокот на компјутерската визија и препознавањето на објекти, аугментираната реалност овозможува интерактивна манипулација на дигитални информации во реалната околина [95], [96].

Аугментираната реалност наоѓа широка примена во производството, особено во процесите на монтажа, одржување, обука и соработка човек-робот. Преку прикажување на дигитални инструкции и визуелизации во реално време, аугментираната реалност овозможува намалување на времето на извршување, стапката на грешки и когнитивниот напор кај извршителите, при што ефектите се поизразени кај посложени процеси. Архитектурата на аугментираната реалност составена од шест дела е дадена на Слика 2.14, адаптирана според [97].



Слика 2.14 Рамка на функционирање на технологијата на аугментирана реалност

Во одржувањето, аугментираната реалност овозможува далечинска поддршка, чекор-по-чекор инструкции и значително намалување на трошоците и застојот на опремата. Дополнително, аугментираната реалност придонесува за подобра безбедност и поефикасна интеракција помеѓу луѓето и роботите преку визуелизација на безбедни зони и потенцијални опасности, што ја позиционира како значајна технологија во контекст на Индустија 4.0 [98].

Системска интеграција

Интеграцијата и само-оптимизацијата претставуваат два клучни механизми во современата индустриска организација. Парадигмата на И4.0 се темели на три димензии на интеграција: (а) хоризонтална интеграција низ целиот синџир на создавање вредност, (б) вертикална интеграција и вмрежени производствени системи и (в) интеграција „од крај до крај“ низ целиот животен циклус на производот. Целосната дигитална интеграција и автоматизација на производствените процеси во хоризонтална и вертикална насока подразбира и автоматизирана комуникација и соработка, особено преку стандардизирани процеси, што овозможува поефикасно, флексибилно и интелегентно производство [99], [100].

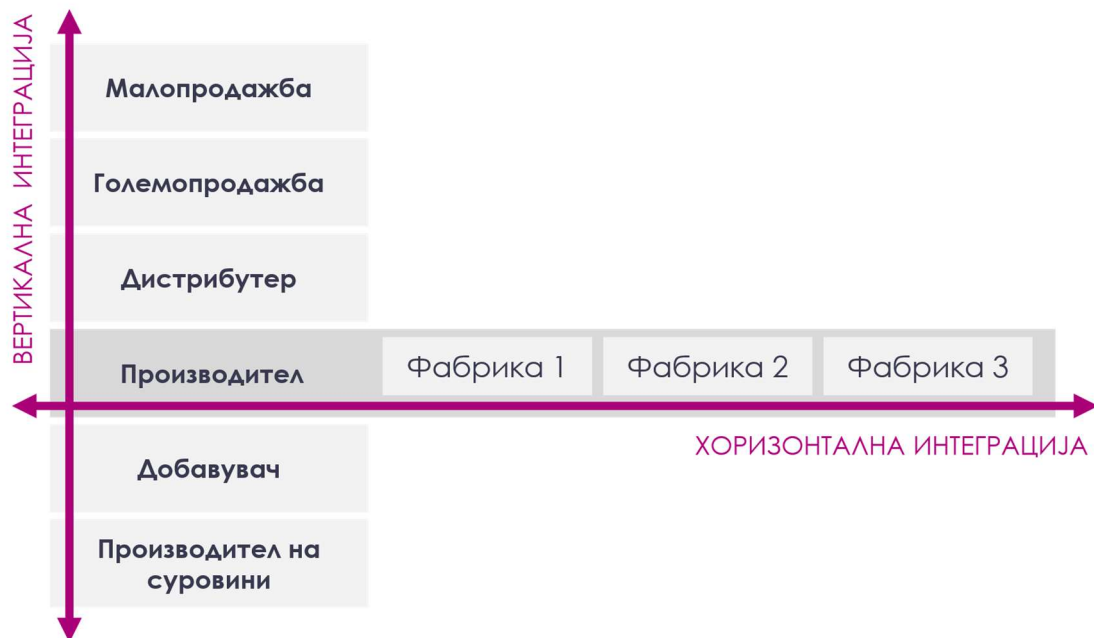
Хоризонталната и вертикалната интеграција во контекст на И4.0 подразбираат сеопфатно интердисциплинарно поврзување на процесите, системите и учесниците, со активно вклучување на клиентите и деловните партнери во процесите. Преку комбинирање на производи и услуги, овие интеграции овозможуваат зголемување на квалитетот, флексибилноста и додадената вредност во производствените системи.

Визуелизација на хоризонтална и вертикална интеграција на производен систем, дадена е на Слика 2.15, прилагодена според [101].



Слика 2.15 Визуелизација на хоризонтална и вертикална интеграција во производство

Интеграцијата на системите може да се разгледува и од аспект на поврзување на различни компании кои извршуваат различни функции во синцирот за снабдување, прикажано на Слика 2.16.



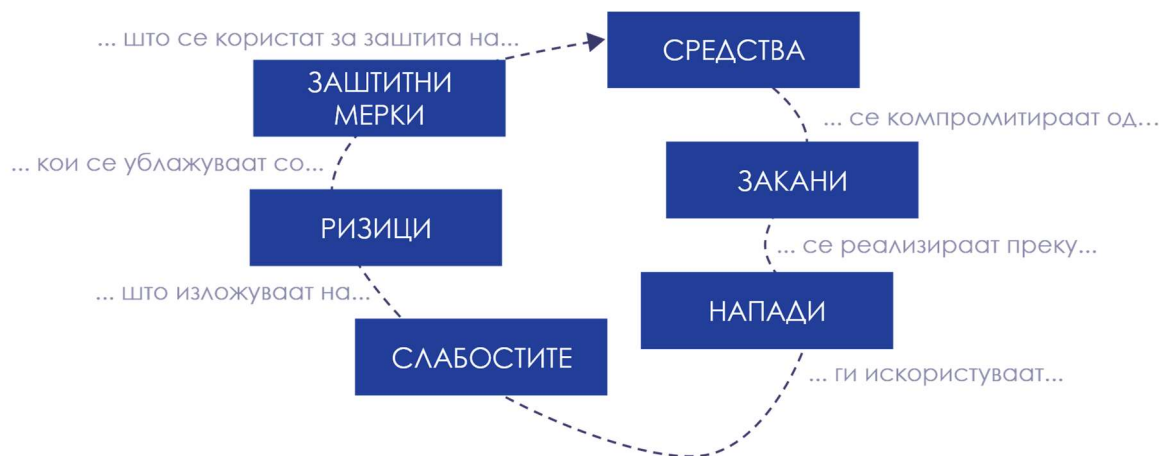
Слика 2.16 Интеграција на системите на ниво на синцир на снабдување

Според сликата, вертикалната интеграција се однесува на поврзување на сите нивоа во синцирот, од производители на суровини и добавувачи, до производители, дистрибутери, големопродажба и малопродажба. Од друга страна, хоризонталната интеграција претставува поврзување и координација помеѓу компании или

производствени единици на исто ниво, како што се повеќе фабрики во рамки на една корпорација или партнерска мрежа.

Сајбер-безбедност

Со појавата на сложените дигитални технологии и зголемената поврзаност меѓу машините, значително се зголемува потребата од сајбер-безбедност, сигурни комуникации и јасно управување со пристапот на корисници и системи. Преку сензори, интернет на нештата и облак технологии, сајбер-физичките системи овозможуваат собирање и размена на податоци во реално време, што е клучно за планирање, оптимизација, откривање дефекти и поефикасно користење на ресурсите во современите производствени системи. Од друга страна, ваквата интернет поврзаност го зголемува ризикот од нарушување на безбедноста на податоците поврзани со луѓе, производи и доверливи процеси [102]. Поради ова, сајбер-безбедноста станува се поважна технологија во Индустрија 4.0. Оваа технологија се разликува од претходните поради тоа што најчесто е во форма на протокол, процедура или стандард, а поретко во форма на физички уред. Основната логика зад потребата од сајбер-безбедност е дадена на Слика 2.17, прилагодена според [103].



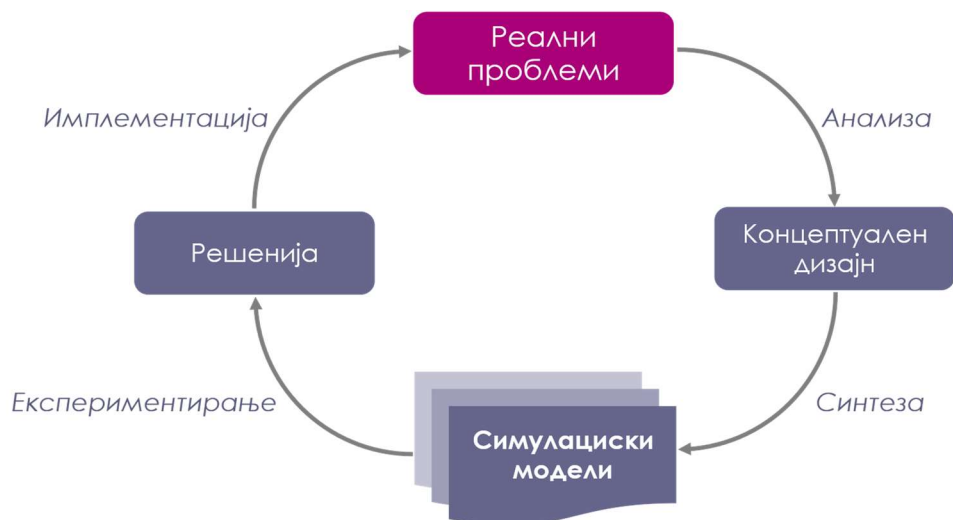
Слика 2.17 Логика зад потребата од сајбер безбедност

Зголемената примена на поврзани уреди и интеграцијата на ИТ системи значително ја зголемува изложеноста на производствените претпријатија на сајбер-напади, иако многу од нив сè уште немаат спроведено посебна проценка на сајбер-ризици. Заканите се реализираат преку напади кои ги искористуваат постоечките слабости, создавајќи ризици за средствата на претпријатието, додека заштитните мерки (сајбер-безбедноста) се применуваат за да ги ублажат тие ризици [104].

Симулации

Симулацијата се користи како алатка за поддршка на донесување одлуки во производствените системи, овозможувајќи релативно побрза, поевтина и поточна анализа на различни сценарија преку виртуелни модели, пред нивна реална имплементација. Таа е широко применувана и во фазата на дизајн и во оперативното управување со производствените системи. Најчесто користените методи за симулација се дискретна симулација (DES), системска динамика (SD) и симулација базирана на

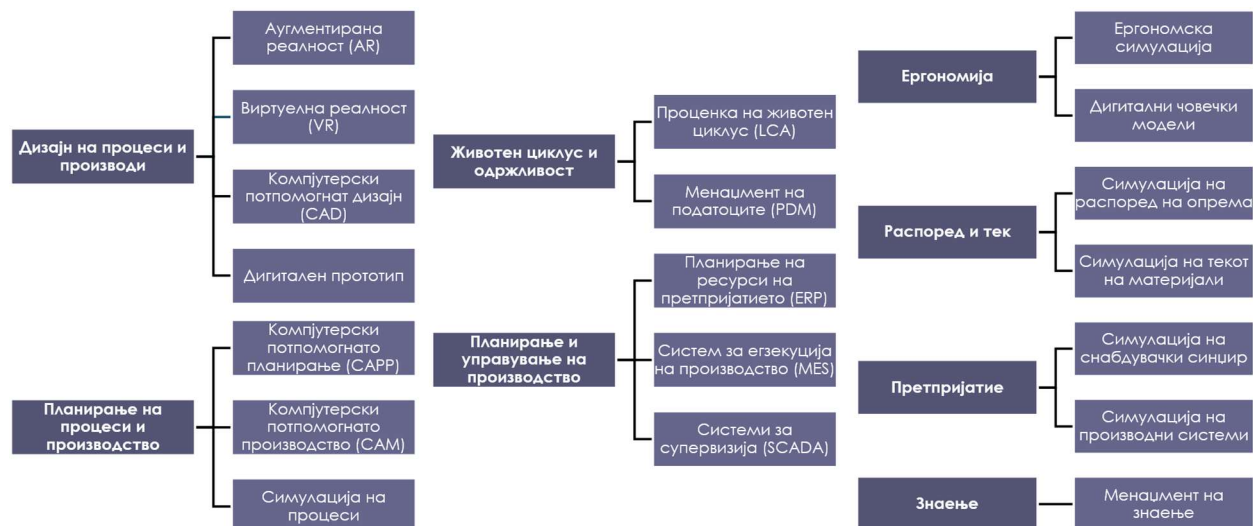
агенти. Симулациите се применуваат на различни нивоа, започнувајќи од распоред на опрема, откривање на тесни грла, управување со синџири на снабдување, се до симулации на целокупното функционирање на претпријатијата [105], [106]. Основната рамка за изведување на симулациите, дадена е на Слика 2.18 [107].



Слика 2.18 Рамка за изведување на симулациите

Симулациските модели се класифицираат според три основни димензии: време на промена, случајност и организација на податоците. Во зависност од тоа дали времето е релевантен фактор, симулациите може да бидат статични или динамички. Статичните симулации не зависат од времето, додека динамичките го опишуваат однесувањето на системот низ времето. Динамичките симулации понатаму се делат на дискретни, каде промените се случуваат во одредени временски моменти, и континуирани, каде времето е континуирана променлива.

Кога симулациите се разгледуваат во контекст на Индустрија 4.0, според [108], постојат голем број на различни симулациски алатки, дадени на Слика 2.19.



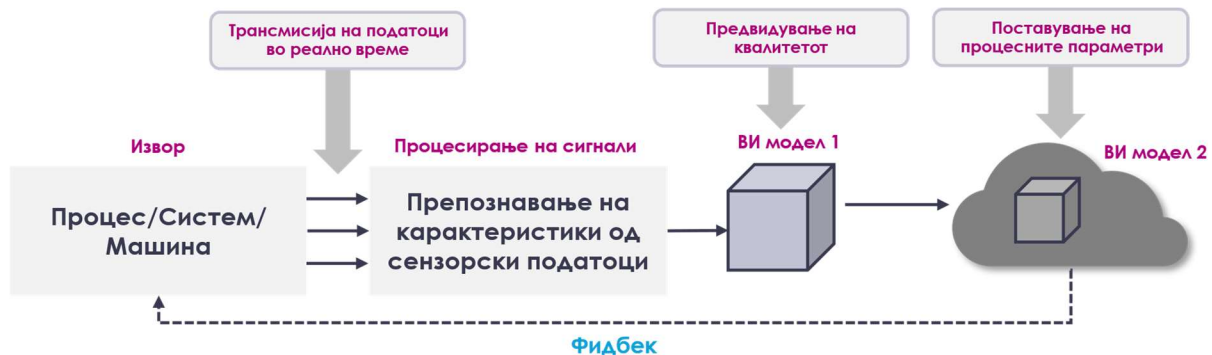
Слика 2.19 Симулациски алатки кај И4.0

Од сликата може да се забележи дека и тука постои преклопување на технологиите т.е. според горенаведениот извор, технологиите на проширена реалност, конкретно аугментираната и виртуелната реалност, спаѓаат под симулациите на производи и дизајн на процеси.

Вештачка интелигенција

Вештачката интелигенција се однесува на развој на системи способни да извршуваат задачи кои вообичаено бараат човечка интелигенција, како што се учење, расудување, решавање проблеми, перцепција и разбирање на јазик. Теоретската основа на вештачката интелигенција произлегува од когнитивните науки и машинското учење, при што се претпоставува дека интелигентното однесување може да се моделира преку алгоритми што ја имитираат човечката когнитивност или преку модели за веројатност и статистика за оптимизација на одлуките со текот на времето [109].

Според [110], вештачката интелигенција има широка примена во производство започнувајќи од дизајн и планирање на системите, автоматизирана и флексибилна монтажа, моделирање на процеси, менаџмент и оптимизација на процеси, контрола на квалитет итн. Рамка за вештачка интелигенција за моделирање, менаџмент и оптимизација на производствените процеси е дадена на Слика 2.20, прилагодена според [111]. Сликата прикажува концепт на интелигентно производство базирано на вештачка интелигенција, каде што податоците од машините и процесите се собираат и обработуваат во реално време. Првиот ВИ модел, врши анализа и предвидување на квалитетот, додека вториот ВИ модел (на облак) предлага оптимални процесни параметри. Преку повратна врска (фидбек), системот овозможува континуирана оптимизација и подобрување на производниот процес.



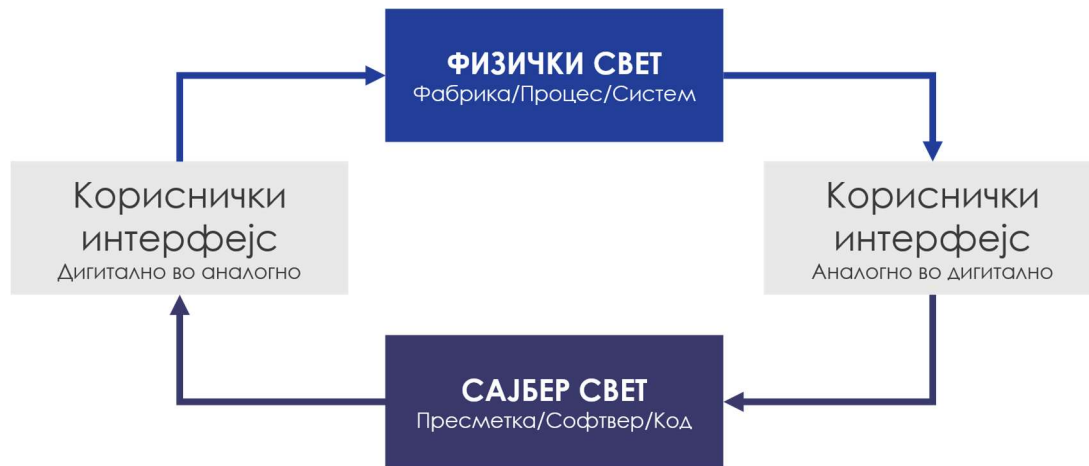
Слика 2.20 Рамка на функционирање на вештачка интелигенција за оптимизација во производството

Сајбер-физички системи

Сајбер-физичките системи (CPS) претставуваат централна точка на Индустрија 4.0, бидејќи тие ги поврзуваат сите други технологии во еден интелигентен, дигитално управуван производствен систем. Сајбер-физичките системи (или некаде Кибер-физичките системи) се интегрирани системи кои ги поврзуваат физичките компоненти (машини, сензори, уреди) со дигиталните компоненти (софтвер, мрежи, анализа на податоци). Тие постојано собираат податоци од физичкиот свет, ги обработуваат дигитално и испраќаат повратни информации за контрола на процесот (Слика 2.21). Дијаграмот ја прикажува врската помеѓу физичкиот и сајбер светот, односно основата логика на функционирање на еден сајбер-физички систем. Податоците од физичкиот процес се претвораат во дигитална форма, се обработуваат во софтверот, а потоа резултатите повторно се враќаат во физичкиот систем како команди или дејства. Главни компоненти на сајбер-физичките системи се:

- физички слој - машини, актуатори, сензори, производствена опрема,
- сајбер слој - компјутери, облачни системи, алгоритми со вештачка интелигенција,

- комуникациски слој - мрежи кои ги поврзуваат физичкиот и дигиталниот систем (Wi-Fi, IoT, 5G), и
- контролен слој - систем за одлучување кој користи повратни информации.



Слика 2.21 Рамка на функционирање на сајбер-физичките системи

Со зголемената поврзаност и примената на стандардизирани комуникациски протоколи во рамки на Индустрија 4.0, значително се зголемува потребата за заштита на критичните индустриски системи и производствените линии од сајбер-безбедносни закани, што ја прави неопходна сигурната комуникација и напредното управување со идентитет и пристап на машини и корисници. Сајбер-физичките системи претставуваат тесна интеграција на физичкиот и дигиталниот свет преку пресметување, комуникација и контрола, овозможувајќи децентрализирано и автономно однесување на производните процеси. Преку континуирана размена на податоци во реално време, поддржана од облак технологии, CPS го овозможуваат концептот на „digital shadow“, односно виртуелна репрезентација на физичките објекти, што е клучно за планирање, оптимизација и оперативно управување со производствените системи.

2.1.2. Принципи на Индустрија 4.0

Како што е претходно дадено на Слика 2.2, при дефинирањето на Индустрија 4.0, принципите се оние кои ја обликуваат Индустрија 4.0 („shapers“) [29], [112], [113]. Индустрија 4.0 се темели на збир на дизајнерски и организациски принципи кои овозможуваат флексибилни, интелигентни и поврзани производствени системи. Според изворите, дизајн принципите на системите на Индустрија 4.0 се:

- **модуларност** - се однесува на дизајнот на производствените системи како збир од независни и лесно заменливи компоненти кои можат ефикасно да се додаваат или отстрануваат (принцип на „plug-and-play“). Овој пристап овозможува агилни и флексибилни производствени системи способни брзо да се прилагодат на променливи нарачки, персонализирани производи и воведување нови технологии,
- **поврзаност** - (или интероперабилност) претставува способност на различни системи, машини и луѓе да разменуваат и разбираат информации преку имплементирани дигитални системи. Таа овозможува отворена и сигурна комуникација, споделување значајни податоци и координирано однесување на системските компоненти,
- **децентрализација** - овозможува автономно функционирање и локално донесување одлуки во рамки на производствените системи, наместо

централизирана контрола. Одлуките се носат во реално време и се усогласени со целите на организацијата. Овој принцип ја зголемува флексибилноста, ја намалува потребата од човечка интервенција и ја подобрува способноста за одговор на индивидуални и персонализирани нарачки,

- **виртуелизација** - овозможува создавање дигитални репрезентации на физички ресурси или поделба на физички ресурси во повеќе виртуелни ентитети. Преку дигитални близнаци и CPS, физичките системи се симулираат, следат и оптимизираат во реално време, што овозможува подобро управување со перформансите. Дополнително, употребата на виртуелна и проширена реалност значително придонесува за обука на персоналот, поддршка на одржување и подобрување на процесите на дизајн и склопување,
- **работа во реално време** - е клучна карактеристика на системите на Индустрија 4.0 и се базира на континуирано собирање, анализа и користење на податоци за поддршка на одлучувањето. Оваа способност овозможува брз одговор на внатрешни промени, како дефекти на машини, и надворешни промени, како на пример, барања на клиенти. Преку реално-временска анализа, организациите можат да ги следат перформансите, да идентификуваат можности за подобрување и да обезбедат стабилност и отпорност на производствените системи,
- **ориентација кон услуги** - овозможува производствените компании да одговорат подобро на потребите на клиентите преку комбинација на анализа во реално време. Наместо исклучиво продажба на производи, претпријатијата можат да понудат интегрирани производно-услужни решенија, поддржани од облак технологии. Овој пристап пред сè го става во фокус клиентот, што во основа значи зголемување на задоволството на клиентот, а со тоа потенцијално и профитот.

2.1.3. Придобивки од Индустрија 4.0

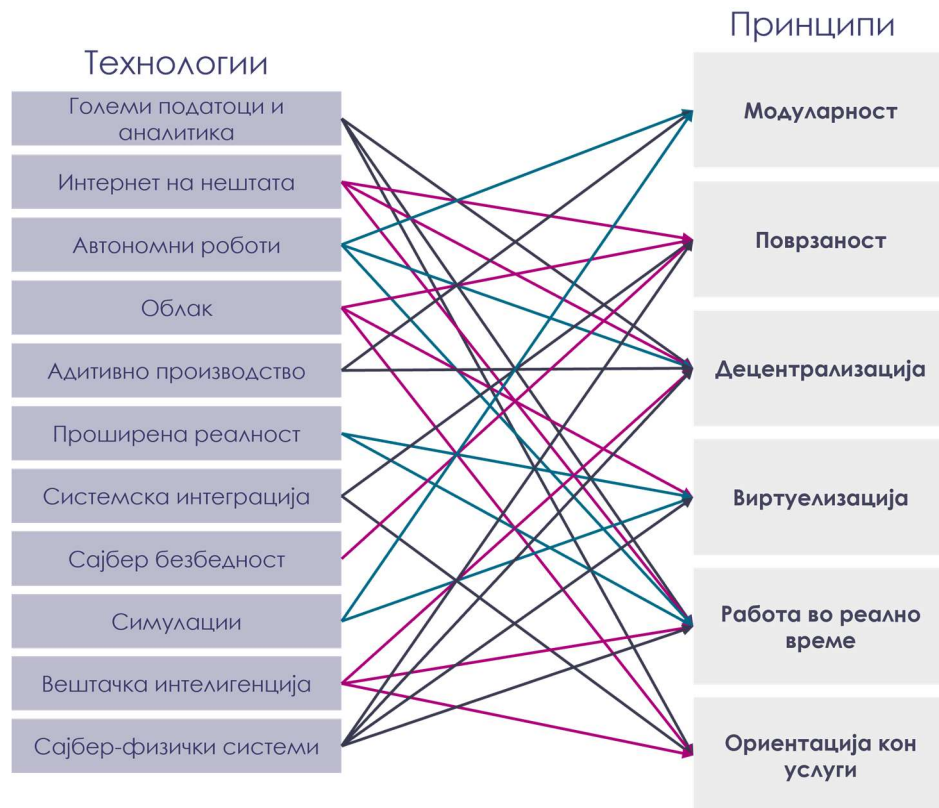
Листата со придобивки од Индустрија 4.0 не може да биде конечна, но наоди за истите се исклучително важни за оправдување на напорите за имплементација на дигиталните технологии. Во оваа дисертација, придобивките играат улога на оправдувачи „justifiers“, според Слика 2.2 за имплементација на дигиталните технологии. Како што е опсервирано во литературата, придобивките од Индустрија 4.0 зависи од контекстот во кој се разгледува концептот, дали од производствена, логистичка, бизнис или технолошка перспектива [114], [115], [116].

Дел од придобивките за производството се веќе дискутирани за секоја од поединечните технологии, а имплементацијата на секој од принципите јасно може да се поврзе со придобивките од Индустрија 4.0. Тука може да се заклучи дека сепак, придобивките на Индустрија 4.0, во најширока смисла се идентични како и кај останатите концепти за трансформација на процесите и претпријатијата (Lean менаџмент, бизнис процес реинженеринг итн.) и се сведуваат на зголемување на квалитетот и флексибилноста, а намалување на времињата и трошоците.

На Слика 2.22 дадена е сопствено видување на врските помеѓу овозможувачите, обликувачите и оправдувачите на Индустрија 4.0 (симболично: трио на Индустрија 4.0), базирана на претходната визуелизација на Слика 2.2.

Треба да се напомене дека е тешко да прецизно се дефинира кои придобивки се директно поврзани со одредена технологија, бидејќи во реални производни услови најчесто се имплементираат повеќе технологии истовремено и нивните ефекти меѓусебно се надополнуваат. Поради тоа, речиси сите технологии на Индустрија 4.0

потенцијално можат да придонесат кон подобрување на времето, трошоците, флексибилноста и квалитетот, но со различен интензитет и во зависност од контекстот на имплементација.

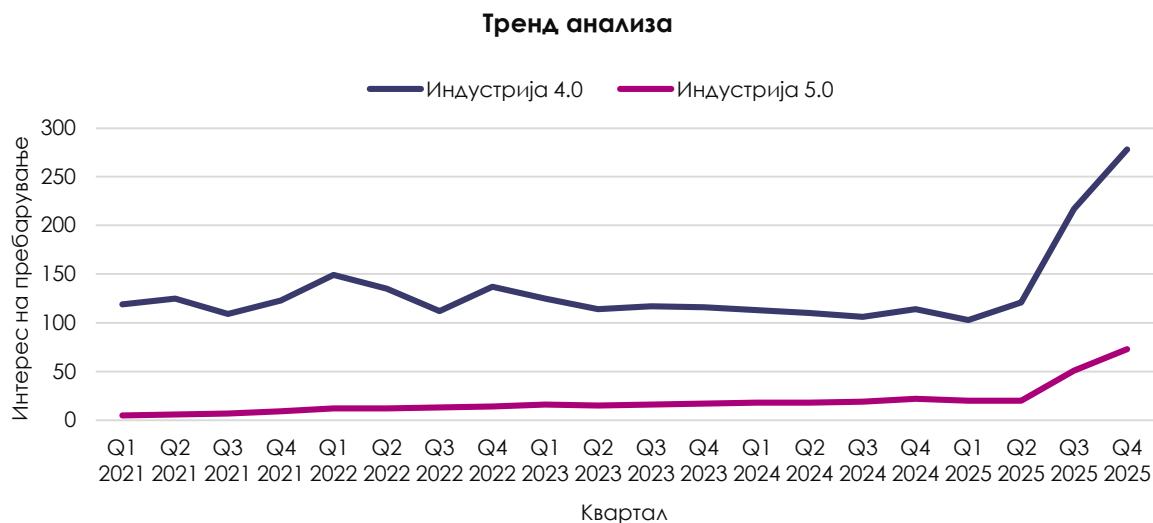


Слика 2.22 Врски помеѓу триото на Индустрија 4.0

Сепак, според анализата дадена на сликата и дефинираните придобивки, истите најизразени се кај големите податоци и аналитика, автономните роботи и сајбер-физичките системи, бидејќи овие технологии истовремено овозможуваат анализа и обработка на податоци, автономно донесување одлуки, интеграција на физички и дигитални системи и работа во реално време. Дополнително, симулациите се издвојуваат како значајна технологија за намалување на трошоците и подобрување на флексибилноста и квалитетот преку виртуелно тестирање и оптимизација на процесите пред нивна реална имплементација.

2.2. Човекот во Индустрија 4.0

Еден од главните предизвици поврзани со актуелизирањето на дигиталните технологии се однесува на човечките ресурси и улогата на човекот во новите дигитални екосистеми. Брзиот развој на дигиталните технологии често предизвикува загриженост дека високо-технолошките системи можат делумно или целосно да го заменат човекот на работните места. Оваа загриженост е генерално и најчесто споменуван недостаток на Индустрија 4.0. Поради ова, еден дел од академската заедница затапуваат и нова парадигма, Индустрија 5.0, притоа карактеризирајќи ја како надградба на Индустрија 4.0 со значително поголем фокус на човековиот фактор. Во практиката, популарноста на двата термини е значително различна. Едноставната тренд анализа базирана на веб-пребарувања по квартали (Q) за последните пет години е прикажана на Слика 2.23.



Слика 2.23 Тренд анализа за И4.0 и И5.0

Дијаграмот прикажува јасен тренд на значително поголем интерес за Индустија 4.0 во споредба со Индустија 5.0 во текот на целиот анализиран период. Интересот за Индустија 4.0 постепено расте од 2021 година, со умерени флукуации во периодот 2022-2024, а потоа се забележува изразен скок во текот на 2025 година. Во последните четири квартали од анализираниот период, вредностите се зголемуваат над 100% споредено со претходните години. Од друга страна, интересот за Индустија 5.0 останува значително понизок во текот на целиот период, иако може да се забележи постепено зголемување, особено во 2025. Ова укажува дека концептот на Индустија 5.0 почнува да добива поголемо внимание, но сè уште не го достигнува нивото на интерес што го има Индустија 4.0.

За да се направи по квалитативна споредба помеѓу двете парадигми, ќе во продолжение ќе се искористи квалитативна компаративна анализа [1]. При дефинирањето на Индустија 4.0 и Индустија 5.0, постојат неколку заеднички критериуми според кои можат да се опишат овие концепти. Според различни извори, но и од сопствени истражувања, избрани се критериуми што ќе се користат за компаративна анализа на двата термин [117], [118], [119], [120]. Критериумите и квалитативните споредби според истите критериуми се дадени во Табела 2.3.

Табела 2.3 Квалитативна компаративна анализа според избраните критериуми

Критериум	Индустрија 4.0	Индустрија 5.0
Фокус	Паметно производство и дигитализација.	Одржливост, отпорност и фокус на човекот.
Автоматизација	Имплементација на што повеќе автоматизација.	Автоматизацијата во фокус го става човекот и како истата му помага.
Културолошка подготвеност	Релативно слаба.	Многу слаба.
Прилагодливост на производите	Масовна персонализација.	Хипер-персонализација.
Искористување на податоците и аналитика	Податоците и автоматизираната анализа се користат за оптимизација на процесите, а луѓето имаат стратешка улога.	Фокусот е на собирање податоци за донесување одлуки во производството, додека луѓето имаат водечка улога во стратегијата.
Економско влијание	Големи инвестиции во дигитални технологии и опрема.	Инвестиции во стратегија и управување на технологијата.
Флексибилност и адаптивност	Подобрување на процесите преку податоци во реално време и автоматски повратни информации.	Проширување на адаптивност со нагласена флексибилност на извршителите.

Критериум	Индустрија 4.0	Индустрија 5.0
Фокус на човекот	Дигитализацијата го поддржува рачниот процес секаде каде што може да се имплементира.	Човекот има централна улога, со фокус на креативност, иновации и персонализирани решенија.
Паметни производи	Не се во фокус.	Искусството на клиентот е најважно.
Социјално влијание	Инди­ректно влијае, но не е главен фокус.	Значително влијание со цел подобрување на општествената благосостојба.
Одржливост и животна средина	Инди­ректно влијае, но не е главен фокус.	Еден од основните принципи покрај отпорноста и ориентацијата кон човекот.
Технолошка интеграција	Целта е високо поврзано и податочно ориентирано производство.	Продолжува со напредни технологии, но со интензивно унапредување на човечките способности.

За појаснување, оваа анализа не ја одредува супериорноста на еден концепт над другиот, бидејќи листата на критериуми за споредба не е исцрпна и може да опфати дополнителни аспекти каде што секој концепт може да се истакне. Оваа споредба има за цел да ги разјасни основните карактеристики и да обезбеди споредба само според дадените критериуми.

Индустрија 4.0 генерално се карактеризира со постојан стремеж за автоматизирање на постоечките процеси, користејќи што е можно повеќе технологија. Иако е релативно слаба подготвеноста за Инду­стрија 4.0, сепак ова единствен критериум според која таа се издвојува, што веројатно се должи на тоа што овие технологии се користат повеќе од една деценија. [29]. **Индустрија 5.0** се карактеризира со прилагодување, ориентација кон човекот, паметни производи и високо социјално и еколошко влијание, што доведува до поизразена поддршка за потребата од одржливост. Во основа, може сепак да се заклучи дека Инду­стрија 5.0 ги има истите карактеристики во поглед на технологиите, принципите и целите, но се обидува да го врати влијанието на човечките одлуки при примената на истите.

2.3. Согледувања и заклучоци

Во ова поглавје беше направен преглед на литературата поврзана со технолошката револуција и концептот Инду­стрија 4.0. Инду­стрија 4.0 беше разгледана преку три аспекти: технологии (овозможувачи), принципи (обликувачи) и придобивки (оправдувачи). Преку анализата беше извршена идентификација на клучните дигитални технологии, како и на принципите и придобивките кои произлегуваат од нивната примена во производството. Дополнително, беше истакната и значајната улога на човекот во современите производни системи, преку споредба на концептите на Инду­стрија 4.0 и Инду­стрија 5.0, кој во основа претставува надградба на првиот со димензиите на одржливост и ориентираност кон човекот.

Поради големиот број на литературни извори кои се однесуваат на листа со дигитални технологии на Инду­стрија 4.0, се јавува потреба за усвојување на една ваква, што беше направено преку консензус на повеќето литературни избори, при што утврдени беа единаесет технологии на кои ќе се однесува фразата „дигитални технологии на Инду­стрија 4.0“. Конечно согледување на технологиите заедно со класификација согласно нивната честота на појавување во литературата е дадено на Слика 2.24.



Слика 2.24 Технологии на Индустија 4.0

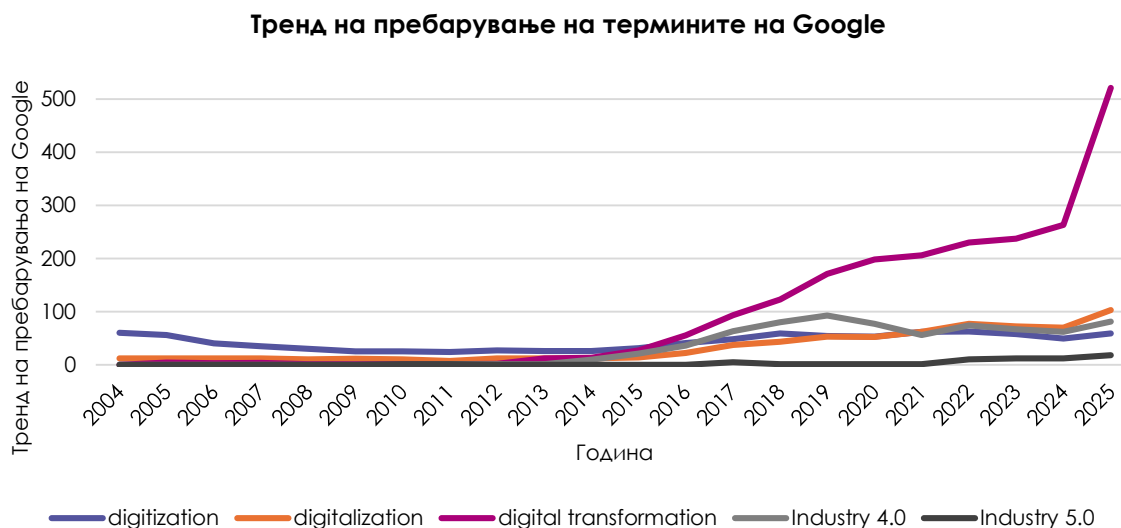
Сепак, самата примена на технологии не е доволна за постигнување одржлива трансформација. При имплементација на дигиталните иницијативи во производство, потребно е да се земат во предвид и веќе воспоставените филозофии, како Lean менаџментот. Поради тоа, во следното поглавје се разгледува дигиталната трансформација во производството, со посебен фокус на Lean менаџментот и неговата поврзаност со дигиталните технологии. Како филозофија за рационализација на процесите, Lean, треба потенцијално да ја олесни имплементацијата на дигиталните технологии во производството.

3. ДИГИТАЛНА ТРАНСФОРМАЦИЈА ВО ПРОИЗВОДСТВОТО

Дефинирањето на поимот дигитална трансформација (ДТ) започнува со разбирањето на концептуалната разлика помеѓу поимите дигитизација („digitization“), дигитализација („digitalization“) и дигитална трансформација („digital transformation“). За да се дефинираат нивните разлики, разгледани ќе се три аспекти - јазичен, технички дефиниции и трендови на пребарување на термините. За разлика од англискиот јазик, повеќето јазици како германски, шпански, јапонски и македонски, не прават разлика меѓу дигитизација и дигитализација, иако овие два процеси имаат клучни разлики. Во македонскиот јазик, според двата достапни дигитални речници, поимот дигитизација не постои, додека другите два концепти се дефинирани на следен начин:

- дигитализација (именка, едн. ж.) - воведување на дигитални уреди,
- дигитален/а/о (придавка) - уред, апарат што функционира врз база на бинарните броеви 0 и дигитален сметач.

Од аспект на трендот на пребарување, на Слика 3.1, прикажан е надополнет дијаграм во однос на Слика 2.23, каде, од Google Trends, додадени се податоци за трендот на пребарување и на трите горенаведени термини од 2004 година.



Слика 3.1 Тренд на пребарување на термините дигитизација, дигитализација и дигитална трансформација

Евидентно е дека поимот дигитизација е најпопуларен од 2004 до 2015, што одговара на неговата техничка примена како претходник на дигитализацијата и дигиталната трансформација. Дигитализацијата и дигиталната трансформација пак, значителна популарност забележуваат во 2015 и 2013 респективно, а значително попребарувани од дигитизацијата во 2016 година. Најголема разлика во популарноста помеѓу овие два термини и дигитизација се забележува во 2019, а од тука натаму, трендот на пребарување поимот дигитална трансформација значително се издвојува од останатите два термини, достигнувајќи го својот врв во 2025. Трендот на пребарување на дигитизација и дигитализација е прилично стабилен (и солиден) во последните пет години, со мала разлика која дигитализацијата ја прави по популарна од дигитизацијата во 2025тата година. И дигиталната трансформација и дигитализацијата, во 2025 се попребарувани од поимите Индустија 4.0 и Индустија 5.0.

Од аспект на истражување, во базата на Scopus, до крајот на 2025 година постојат вкупно 24 309 документи поврзани со термините. Најмногу документи одговараат на клучниот збор „Индустија 4.0“ (10 119 документи), проследен од „дигитална трансформација“ (9 953 документи). Доколку направиме филтрирање по област во која се објавени научните трудови (трудови во списанија, конференции и делови од книги) во инженерство, компјутерски науки, бизнис и менаџмент и социјални науки (како најблиски до областа на истражување на овој труд) добиваме сличен резултат во врска со популарноста на термините која, повторно расте значително во последните неколку години. Извадок од статистиката на Scopus, даден е на Слика 3.2.



Слика 3.2 Тренд на објавување на трудови на Scopus

Од технички аспект, може да се разгледаат повеќе дефиниции со цел да се издвојат клучните зборови кои ги дефинираат трите концепти. Во Табела 3.1 направена е кратка анализа на дефинициите за концептите низ литературата, притоа втората колона во табелата ги дава конкретните дефиниции и соодветните извори, додека третата колона ги издвојува најчесто користените клучни зборови користени за да се дефинираат концептите.

Согласно прегледот на литературата во Табела 3.1, **дигитизација** претставува процес на преобразување на аналогни или физички податоци во дигитална форма што може да се зачува, обработува и користи преку компјутерски системи. Таа вклучува директна конверзија на аналогни записи, содржини или информации во дигитални формати (битови 1 и 0), со цел да се овозможи нивна понатамошна употреба во информациски системи, организациски процеси или технолошки апликации.

Понатаму, **дигитализација** претставува процес на подобрување, автоматизација и оптимизација на бизнис-процесите преку користење дигитални технологии и дигитално генерирани податоци. Таа овозможува активности да се извршуваат поефикасно, да се активираат и искористат дигиталните информации, како и да се трансформираат процесите зависни од човек и документи во компјутерски контролирани системи.

На крајот, може да се надоврзе и дефиницијата за дигиталната трансформација, произлезена од Табела 3.1, според која **дигиталната трансформација** претставува процес на организациска промена што произлегува од искористувањето на дигиталните технологии и податоците, со цел создавање нови бизнис модели, редицајн на процеси и зголемување на ефикасноста, вредноста и иновативноста. Таа ги менува начинот на кој

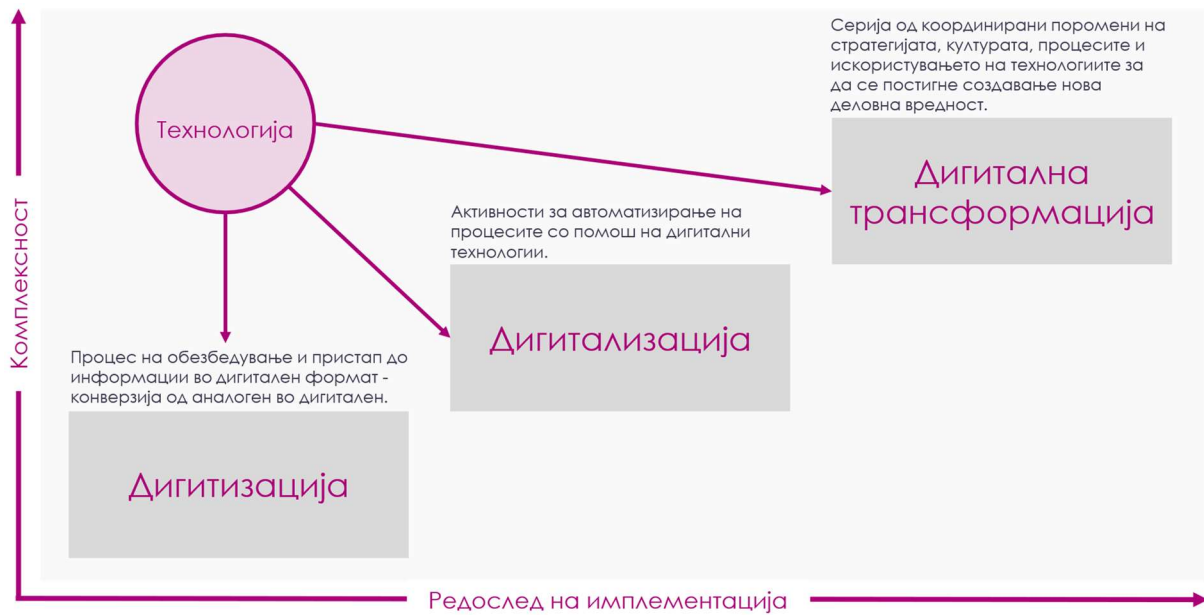
организацијата функционира, донесува стратегии ориентирани кон дигитална вредност и овозможува континуирано подобрување преку интеграција на технологиите во сите делови од работењето.

Табела 3.1 Дефиниции на термините

Концепти	Дефиниции	Клучни зборови
Дигитизација...	<ul style="list-style-type: none"> a. .. е процес на промена од аналогна во дигитална форма, познат и како дигитално овозможување [121]. b. ... претставува премин од аналогно кон дигитално [122]. c. ... е трансформација на податоци [123]. d. ... е процес на воведување или зголемување на употребата на дигитална или компјутерска технологија во организација, индустрија или држава [124]. e. ... е преминување на деловните процеси од аналогна во дигитална форма [125]. f. ... е конверзијата од континуирани аналогни информации со шумови во јасни бинарни вредности составени од 1 и 0 [126]. g. ... е трансформација на аналогна содржина во форма што компјутерите можат да ја обработуваат [127]. 	Аналогно кон дигитално, конверзија на податоци.
Дигитализација...	<ul style="list-style-type: none"> a. ... ги подобрува процесите користејќи ги дигиталните технологии и дигитизираните податоци [121]. b. ... е процесирање на податоци [123]. c. ... има за цел да ги анализира и искористи дигитизираните информации [125]. d. ... е трансформација на процесите кои се зависни од човек и документи во компјутерски контролирани системи [127]. 	Искористување на дигитизирани податоци, процесирање на податоци.
Дигитална трансформација...	<ul style="list-style-type: none"> a. ... го претставува трансформациониот ефект на новите дигитални технологии [121]. b. ... ја подигнува идејата на дигитализација на ново ниво создавајќи нови бизнис модели и раст на екосистемот [122]. c. ... има за цел да го промени начинот на кој компаниите функционираат и размислуваат преку искористување на информациите [123]. d. ... е дефинирана како фундаментална промена на работата на бизнисот и бизнис моделот базирана на нови знаења и додадена вредност [124]. e. ... промена на ниво на целото претпријатие потпомогната од дигиталните технологии [124]. f. ... бара промена на деловните практики и стратегии за да се зголеми дигиталната ефикасност, додадената вредност, оптимизацијата и севкупниот перформанс [127]. 	Нов бизнис модел, организациска промена, фокус на додадена вредност и ефикасност, искористување на податоци.

Според дефинициите, веќе јасно може да се направи и хиерархиска разлика од аспект на предност на имплементирање на трите концепти. Според [122], единствената вистинска поврзаност меѓу дигитизација и дигитализација (покрај сличниот начин на запишување) е тоа што дигитализацијата може да се случи само ако претходно е извршена дигитизација. Дигитизацијата ја опфаќа техничката конверзија на аналогни податоци во дигитален формат, додека дигитализацијата претставува поширок процес на користење дигитални технологии за подобрување или автоматизација на постоечките активности. На ова се надоврзува дигиталната трансформација, која подразбира подлабока, стратегиска промена на деловните модели, организациската структура и културата.

Оваа врска помеѓу концептите е дадена на Слика 3.3, каде истите се споредени според два критериуми, комплексност и редослед на имплементација.



Слика 3.3 Врска помеѓу дигитизација, дигитализација и дигитална трансформација

Од литературата, тука треба да се споменат и други нови концепти кои се појавуваат во литературата, но сè уште не се забележува нивна голема популарност во споредба со претходните три:

- **дигитална трансфигурација** („digital transfiguration“) - е реконфигурација на општеството на ниво на екосистем, водена од целосна дигитална меѓусебна поврзаност, каде што процесите, однесувањата и општествените норми се преоблекуваат во нова социо-техничка реалност надвор од традиционалната дигитална трансформација [122].
- **двојна транзиција** („twin transition“) - се однесува на истовремената и меѓусебно поврзана трансформација кон зелена и дигитална економија и е една од централните идеи на Европскиот Зелен Договор [128].

Како што може да се види низ дефинициите во Табела 3.1, често при дефинирањето на дигиталната трансформација се користат неколку клучни зборови, вклучувајќи ги:

- „искористување на дигиталните технологии“ - што претставува процес на планирање, интеграција и примена на дигитални решенија со цел подобрување на организациските процеси, производи и деловни модели,
- „создавање на вредност“, - што претставува процес на создавање на производ или услуга која е од интерес за клиентите (ова се постигнува и преку додавање нови карактеристики, подобрување на квалитетот или обезбедување подоро корисничко искуство),
- „подобрување на перформансите“ - што претставува зголемување на ефикасноста, конкурентноста и вкупните организациски резултати преку подобрување на економските, оперативните, еколошките, социјалните или показатели важни за специфична организација,
- „стратешка промена“ - што се однесува на тоа што дигиталната трансформација подразбира редефинирање на визијата, приоритетите и бизнис моделот со цел дигиталните технологии да се искористат за создавање нова вредност и одржлива конкурентска предност.

3.1. Слоеве на дигиталната трансформација

Иако литературата на оваа тема вообичаено го користи терминот „столбови на дигитална трансформација“ [129], во овој труд ќе биде искористен терминот „слоеве на дигиталната трансформација“. Слоеве ќе се користат наместо столбови поради тоа што дигиталната трансформација е меѓузависен систем и систем кој еволуира, каде што секој аспект се надоградува и ги зајакнува другите, формирајќи интегрирана архитектура, наместо изолирани структурни елементи (како на пр. столбови). Користењето слоеви наместо столбови подобро ја доловува вистинската природа на дигиталната трансформација, бидејќи покажува дека стратегијата, луѓето, процесите и технологијата не функционираат како изолирани елементи, туку како меѓузависни компоненти што се надоврзуваат и меѓусебно се условуваат. Словите природно претставуваат развој, зрелост и последователно напредување, секој следен слој се гради врз стабилноста на претходниот. Овој пристап создава појасна логика на интеграција, усогласеност и еволуција во трансформацијата, што многу подобро ја рефлектира реалната динамика на овој процес.

Традиционално, како главни аспекти на дигиталната трансформација се земаат луѓето, процесите и технологиите. Меѓутоа, при прегледот на литературата, различни наоди покажуваат дека дигиталната трансформација може да се дефинира и преку други димензии, како што може да се забележи во прегледот на литературата во Табела 3.2.

Табела 3.2 Преглед на литературата за слоевите на дигитална трансформација

Слој Извор	Луѓе	Стратегија	Технологии	Процеси	Организација	Податоци	Иновации
[130]	✓	✓	✓	✓			
[131]	✓	✓	✓		✓		
[132]	✓	✓		✓	✓		✓
[133]	✓		✓		✓		
[134]	✓	✓	✓	✓			
[135]	✓	✓	✓	✓		✓	
[136]	✓	✓					
[137]	✓	✓		✓	✓		
Застапеност	100%	88%	62%	62%	50%	12%	12%

Само слојот „Луѓе“ се јавува во сите прегледаните извори, додека “Стратегија” не се среќава само во еден од нив. Во литературата, со помала застапеност се среќаваат и „Организација“ и „Податоци“ како столбови. И во овој преглед на литературата, идентично како и кај прегледот за технологиите, слоевите имаат различни алтернативни имиња низ литературата.

Со цел да се открие што се наоѓа во внатре во овие слоеви, како теоретска подлога се земени постоечки таксономии (поделби, класификации) од литературата кои даваат различни прегледи на карактеристиките на стратегија, луѓе, процеси и технологии, во контекст на производство. Што значат секој од овие термини во производство определено е преку повеќе извори кои најчесто презентираат исти на категории, групи на карактеристики, или описни класификациски рамки. Оваа листа може дефинитивно да се прошири согласно контекстот или деталноста во која идните истражувања би се движеле. Прашањето за редоследот на имплементација на секој од слоевите е исто така релевантно, и иако одговорот е интуитивен, повеќе ќе биде дискутирано при концептуализација на рамката за дигитална трансформација.

На Слика 3.4, за секој слој на дигиталната трансформација (C1-C4) направен е обид за стандардизирано дефинирање преку минимум еден глагол и главната цел која треба да

ја исполни секој слој. Секој слој има специфички односно домени во кои може да се разгледува во една производствена организацијата.



Слика 3.4 Слоеви на дигиталната трансформација

Во најширока смисла, слојот „Стратегија“ е утврдување на основните цели претпријатието и лоцирање на ресурси и активности потребни за остварување на тие цели. Таксономијата за поимот компаниска стратегија, вообичаено дава четири типови на стратегија на претпријатијата во чии рамки може да се разгледува дигиталната трансформација како дел од стратегијата, односно: корпоративна стратегија, деловна (бизнис) стратегија, функционална стратегија и оперативна стратегија.

Според [138], стратешкиот пат на корпорацијата може да оди во различни насоки. Овој труд заклучува со предлог дефиниција за корпоративна стратегија според прегледот на литературата, корпоративната стратегија може да се дефинира како збир на (деловни) стратегии имплементирани во рамките на деловната мрежа со цел да се максимизира профитабилноста и присуството на пазарот. Според [139] на највисоко ниво од хиерархијата е корпоративната стратегија. Корпоративната стратегија го идентификува множеството бизниси, пазари или индустрии во кои организацијата се натпреварува и распределбата на ресурсите меѓу тие бизниси. Потоа следува деловната (бизнис) стратегија која се однесува на специфичните начини за тоа како компанијата ќе издвои „победа“ во множеството на бизниси/пазари/индустрии кои се предвидени според корпоративната стратегија. Функционалната стратегија се однесува на одделните функции/оддели на едно претпријатие. Иако поретко, во литературата, понекогаш се спомнува и оперативна стратегија, која треба да биде поврзување помеѓу горенаведените типови на стратегии и ден-за-ден („day-to-day“) работењето на вработените. Она што некои извори поврзани со дигитална трансформација го воведуваат како термин е дигиталната стратегија [140], [141], [142], [143]. Според нив, дигиталната стратегија служи како алатка што ги дефинира организациските цели кои треба да ги постигнат дигиталните иницијативи.

Слојот „Луѓе“ потребно е да се осигура (во генерален контекст, не ограничен на дигитална трансформација), дека:

- (1) луѓето знаат кои задачи да ги исполнат и на кој начин,
- (2) луѓето ги имаат вистинските вештини и знаења за работата,
- (3) луѓето се мотивирани и вклучени во работата и одлучувањето,
- (4) луѓето се охрабрени да учествуваат во континуирано подобрување.

Ова одговара со дефиницијата прикажана на Слика 3.4. Слојот луѓе може да се дефинира како поставување (1), обучување (2) и мотивирање (3 и 4) на луѓето кон остварување на компаниските цели. Постојат повеќе домени кои може да се разгледуваат кога се во прашање луѓето во една организација, како: компетенции и вештини, развој, улоги и одговорности, организациска култура, лидерство и управување, менаџмент со промени итн. Според [144], за да се промени целокупната организациска култура, постојат три главни барања кои дигиталната трансформација ги поставува пред организациите кога се во прашање луѓето: нови способности и компетенции, нови форми на лидерство и нови организациски капацитети.

Слојот „Процеси“ е поврзан со создавање на вредност. Од таму овој слој вклучува мапирање и стандардизирање на активности за трансформација на влезовите во излезни резултати (вредност). За производството - тоа претставува производот и/или услугата која едно претпријатие ја/ги понудува на пазарот. Слојот „Технологија“ е поврзан со имплементирање и користење на системи, алатки и уреди што процесираат, складираат и пренесуваат податоци во електронска форма. Кога се во прашање процесите и технологиите, постојат многу класификации, па затоа како теоретска подлога за разбирање на тоа какви се процеси постојат во едно претпријатие земени се класификациите според [145], визуелизиран на Слика 3.4.

3.2. Lean менаџмент

Корените на Lean потекнуваат од јапонската компанија Тојота, поточно од нивниот социо-технички “Toyota Production System” кој претставува сеопфатна менаџерска филозофија на компанијата. Подоцна, овој систем станал основа за поширокиот концепт Lean менаџмент, термин воведен од Џејмс П. Вомак во 1991. Филозофијата на Lean менаџментот добро се објаснува преку „Куката на Lean“ дадена на Слика 3.5. „Куката на Lean“ е симболичен модел кој ги прикажува основните елементи на Lean филозофијата. Како и секоја кука во реалноста, оваа кука има темел, столбови и покрив.



Слика 3.5 Тојота произведен систем

Во основата или во темелите, се наоѓа стабилност постигната преку стандардизација. Тука може вбројат некои од основните алатки кои треба да се имплементираат при иницирање на Lean проекти - „5S“, „Kaizen“, Стандардизирана работа, „Heijunka“ итн. На основата се надоврзуваат двата столба на Lean:

- „Just-in-time“ - производство само тоа што треба, точно кога треба и во количината што треба, и
- „Jidoka“ - автоматизација со човечки допир.

Со текот на годините, Тојота, но и другите научници, развиле различни алатки за да ги претвори овие концепти во практика и да ги примени според специфичните барања и услови во компанијата и бизнисот. Според ова, листата со алатки и методи кои се употребуваат, како за основата, така и за столбовите, не е конечна и ден-денес се менува и надополнува. Покривот го симболизира она што Lean сака да го постигне, односно најчесто таму се наоѓаат аспекти како задоволен клиент и континуирано подобрување. Внатре во куќата на Lean се наоѓаат луѓето, што симболизира мотивација, почит, тимска работа и учење.

Во продолжение, дадени се кратки дефиниции за алатките/методите дадени во куќата на Lean на Слика 3.5:

- стандардизирана работа е документирање на најдобрите практики за извршување на одредена задача во производството со цел обезбедување на конзистентен и повторлив процес (и со тоа квалитетот),
- „Kaizen“ е филозофијата на мали и континуирани подобрувања на процесите, иницирана од страна на вработените на сите нивоа,
- „Heijunka“ е намалување на варијациите и преоптоварувањето во производството,
- „SMED“ е метод за минимизирање на подготвително-завршните времиња за активностите преку делење на истите на активности (односно времиња) кои можат да се извршат додека машината/процесот мирува и активности кои можат да се извршат додека машината/процесот работи,
- „PoKa Yoke“ систем или техничко решение за спречување или сигнализирање при појава на ненамерни грешки,
- влечење („Pull“) е производство и/или снабдување според барањата на клиентот
- такт е ритам на производството според барањата на клиентот,
- тек е континуирано и непречено движење на материјали, информации, извршители или производи низ процесот.

Целта на секое профитно ориентирано претпријатие е да оствари профит. Сепак, профитот не е директна цел, туку резултат од способноста на компанијата да биде конкурентна на пазарот. Компанијата е конкурентна кога создава поголема вредност за клиентите во споредба со своите конкуренти. Тоа значи клиентите да ја препознаат понудата како подобра, побрза, поевтина или пофлексибилна. Во овој контекст, Lean менаџментот се фокусира на подобрување на процесите и зголемување на вредноста за клиентот. За да се постигне тоа, традиционалниот Lean има за цел да ги елиминира трите непожелни практики во работењето: „muri“ (преоптовареност), „mura“ (небалансираност) и „muda“ (растурање). Овие три практики имаат влијанија и на други клучни и поопипливи фактори: квалитетот на производот или услугата, времето на испорака, трошоците (цената) и флексибилноста. Подобрување на само еден од овие елементи најчесто не е доволно - долгорочната конкурентност бара истовремено и континуирано унапредување на сите. Токму овој баланс претставува еден од најголемите предизвици во современото производство.

Слично како кај триото на Индустрија 4.0 (технологии, принципи и придобивки), исто и кај Lean може да се примени слична логика за дефинирање:

- принципи → кои го обликуваат („shapers“),

- придобивки → кои го оправдуваат („justifiers“), и
- алатки → кои го овозможуваат („enablers“).

3.1.1. Принципи на Lean

Иако за Lean се вели дека е отворена филозофија и за истата постојат голем број на практични алатки кои се прифатени како дел од филозофијата, сепак Lean е пристап кој се темели на јасно дефинирани основни правила на размислување и дејствување.

Овие основни правила се познати како Lean принципи. Принципите претставуваат фундаментални претпоставки, односно насоки кои го определуваат начинот на кој Lean филозофијата треба да се разбере и примени во практика. Тие служат како темел врз кој се градат Lean методологијата, алатките и конкретните подобрувања во процесите. Проучувањето на Lean принципите е неопходно бидејќи токму тие ја обезбедуваат врската помеѓу Lean филозофијата и нејзината практична имплементација. Без јасно разбирање на принципите, примената на поединечни Lean алатки често останува фрагментирана и не води кон одржливи резултати. Затоа, принципите мора да бидат интегрирани во начинот на размислување и во управувачкиот пристап на организацијата. Според [146], имплементацијата на Lean треба да следи пет фундаментални принципи, дадени на Слика 3.6, надополнета според [147].



Слика 3.6 Визуелизација на принципите на Lean

Првиот принцип на Lean, „Идентификување на вредност“, се заснова на прашањето „за што ни плаќа клиентот?“ и претставува појдовна точка на Lean менаџментот. Вредноста на производот или услугата е она за што клиентот е подготвен да плати. Вредноста всушност значи дефинирање, односно утврдување на барањата на клиентот. Оттаму, при примена на принципот, важно е да се „слушне гласот на клиентот“, како и да се направи разлика помеѓу внатрешни и надворешни клиенти. Ова дополнително значи дека сè што се прави во организацијата треба да биде директно поврзано со барањата на клиентот, а сè друго се смета за непотребно. Овој принцип

претставува основен предуслов за следниот Lean принцип, бидејќи без јасно дефинирана вредност не може да се продолжи кон анализа на процесите и елиминирање на загубите.

Вториот принцип, **„Мапирање на текот на вредности“**, е насочен кон активноста на елиминирање ги непотребните чекори и има за цел систематско идентификување и разбирање на сите активности што се извршуваат во рамките на еден процес. Основната идеја на овој принцип е дека секој процес е составен од повеќе чекори, но не сите чекори придонесуваат кон создавање вредност за клиентот. Затоа, фокусот не е само на тоа што се прави, туку зошто се прави и дали таа активност е оправдана од аспект на додавање на вредност за клиентот. Примената на принципот мапирање на текот на вредности, започнува со моделирање на процесите. Потоа, активностите се анализираат и се групираат во активности кои додаваат вредност и активности кои не додаваат вредност, при што и вторите дополнително се разгрануваат на потребни и непотребни. Ваквата класификација дава јасна насока за тоа кои чекори треба да бидат елиминирани, а кои подобрани.

Третиот принцип **„Креирање на тек“**, се надоврзува директно на претходниот принцип и е насочен кон активности за обезбедување на непрекинат тек на процесот. Откако со мапирањето на текот на вредности се идентификуваат и елиминираат или минимизираат загубите, следниот чекор е да се обезбеди непречено и континуирано одвивање на процесите. Целта е вредноста да тече низ процесите без непотребни прекини, застои или тесни грла, односно без нарушувања кои го забавуваат или оневозможуваат нормалниот тек. Примената на принципот подразбира секој чекор во процесот да биде стабилен, способен и расположлив тогаш кога е потребен. Истовремено, капацитетот на поединечните чекори треба да биде соодветно усогласен за да се избегнат тесни грла и нерамномерност во текот.

Четвртиот принцип **„Дефинирање на влечење“** се залага да се произведува само она што треба да се произведува и претставува спротивност на традиционалниот пристап во кој вредноста се „турка“ низ процесите. Наместо работење според интерни планови и прогнози, овој принцип бара секоја активност да започне како одговор на реална побарувачка. Тоа значи дека вредноста не се создава однапред, туку истата ја „влече“ клиентот, во согласност со тоа што навистина е побарано. Примената на принципот подразбира дека ниту еден процес не треба да биде активиран доколку за него не постои потреба од наредниот процес или од клиентот. На овој начин се постигнува подобро усогласување помеѓу процесите и побарувачката, значително се редуцираат меѓу-операциските залихи и се создава основа за пократки временски циклуси и помали залихи.

Петтиот принцип, **„Стремеж кон совршенство“**, се темели на активноста на континуирано подобрување и укажува на тоа дека Lean пристапот не завршува со имплементацијата на претходните принципи. Дури и кога се воспоставени јасна вредност, мапиран тек, континуиран проток и систем на влечење, организацијата не треба да застане, туку континуирано да тежнее кон понатамошно подобрување. Целта не е постигнување на апсолутна перфекција како што сугерира името, туку постепено приближување кон подобри и поефикасни решенија. Примената на принципот подразбира прифаќање на Lean како долгорочна филозофија, а не како еднократен проект. Lean претставува патека без крај, при што не се очекува сите проблеми да се решат веднаш. Потребно е време оваа филозофија да се вгради во организацијата и да биде прифатена од вработените, со што се создава култура на континуирано подобрување.

3.1.2. Придобивки на Lean

Lean Manufacturing придонесува кон постепена трансформација на производните и организациските процеси преку создавање постабилен, усогласен и поефикасен систем на работа. Наместо процесите да бидат оптоварени со непотребни активности, доцнења и неусогласености, Lean овозможува подобар тек на работата и поефикасно користење на ресурсите. Како резултат на тоа, една од најзначајните придобивки е намалувањето на загубите и елиминацијата на активности кои не додаваат вредност, што директно влијае врз намалување на трошоците и подобрување на ефикасноста.

Дополнително, Lean придонесува кон подобрување на продуктивноста преку постабилни процеси, подобра организација и пократки времиња на извршување. Со намалување на прекините и оптимизирање на текот на производството, организациите можат да постигнат поголем излез со истите или помали ресурси. Истовремено, Lean има значително влијание и врз квалитетот, бидејќи создава услови за порано откривање на проблемите, намалување на варијациите и поконзистентни резултати. Конечно, подобрената усогласеност на процесите и подобрата организација придонесуваат и кон повисоко задоволство на клиентите преку пократки рокови, посигурни производи и подобро корисничко искуство.

Сепак постојат голем број на извори кои се однесуваат на придобивките од Lean, но речиси секогаш истите се сведуваат на четирите основни придобивки кои веќе се дискутирани во делот на Индустрија 4.0, односно намалување на време и трошоци, а зголемување на квалитет и флексибилност.

Во литературата, придобивките од Lean се гледаат од четири аспекти, и тоа од старана на вработените [148], [149], менаџментот [150], [151], претпријатието [152], [153], [154] и клиентите [155]. Преку сопствена интерпретација на авторот, на Слика 3.7 придобивките од Lean се прикажани низ перспективата на различните нивоа на инволвирани страни во претпријатието.



Слика 3.7 Придобивките од Lean од различни перспективи

Придобивките од Lean исто така можат добро да се прикажат при споредбата на традиционално и Lean производство. Споредбата по дванаесет критериуми, според видување на авторот е дадена во Табела 3.3.

Табела 3.3 Споредба на традиционално и Lean производство

Критериум	Традиционално производство	Lean производство
Филозофија	Максимален излез и искористување	Вредност и минимални загуби
Учество на луѓето	Хиерархиско одлучување	Висока вклученост на вработените и оспособување
Организација на работните места	Хаотични работни места, слаба организациска култура	Дисциплина и стандардизирана работа
Одржување	Планирани ремонти, долги застои	Проактивно и превентивно одржување
Решавање на проблеми	Откако ќе се случат („гасење на пожари“), малите загуби се прифаќаат, а потоа се претвораат во значителни	Спречување да се случат, систематско решавање
Квалитет	Проверки на квалитет	Вграден квалитет во производ/процес
Подобрувања	Оптимизација на работата која додава вредност	Елиминација на чекорите кои не додаваат вредност
Планирање / Тек	Производство во серии, претежно со „туркање“ („push“)	Континуиран тек со „влечење“ („pull“)
Залихи	Високи со високи безбедносни залихи	Производство во вистинско време и количина
Мерење на учинок	Се мери преку искористени ресурси и произведен обем	Се мери преку севкупни показатели за ефикасност и додадена вредност
Начин на анализа Клиенти	Периодични извештаи и анализа Фокус на интерните цели	Во реално време Фокус на тоа што го бара клиентот

3.1.3. Алатки на Lean

Вообичаен начин на претставување на алатките на Lean е преку концептот на „Куќа на Lean“ [156], [157]. Истата е веќе прикажана и дискутирана на Слика 3.5.

Поради големиот број на алатки во литературата, но и поради нивната поширока примена, дури и надвор од производствените системи [158], во **Табела 3.4**, според видување на авторот врз основа на искуството и различните литературни извори [156], [159], [160], [161], ќе бидат дадени неколку примери за алатки кои се поврзани со карактеристиките на Lean производните системи дадени како придобивки во Табела 3.3.

Табела 3.4 Поврзување на Lean-алатките и придобивките од Lean

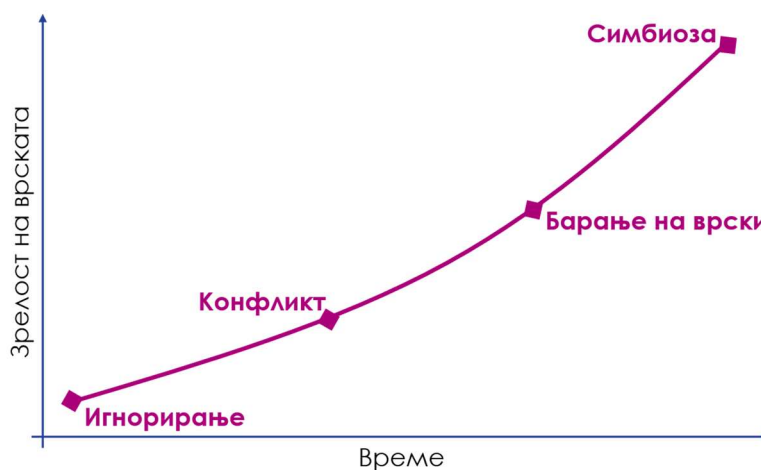
Критериуми <i>Lean-контекст</i>	Поврзани Lean алатки / методи / филозофии
Филозофија <i>Вредност и минимални загуби</i>	Lean-принципи, Lean-размислување [134], [146]
Учество на луѓето <i>Висока вклученост на вработените и оспособување</i>	Kaizen[162], GEMBA, A3
Организација на работните места <i>Дисциплина и стандардизирана работа</i>	5S, визуелен менаџмент, стандардизирана работа [163]
Одржување <i>Проактивно и превентивно одржување</i>	Севкупно одржување на производството (TPM) [164]
Решавање на проблеми <i>Спречување да се случат, систематско решавање</i>	5 Зошто, Дијаграм рибина коска, A3, PDCA, Шест Сигма [161]
Квалитет <i>Вграден квалитет во производ/процес</i>	Jidoka, Poka Yoke, Статистичка контрола на процеси, Andon
Подобрувања <i>Елиминација на чекорите кои не додаваат вредност</i>	Мапирање на тек на вредности (VSM), DMAIC, Kaizen [161]

Критериуми Lean-контекст	Поврзани Lean алатки / методи / филозофии
Планирање / Тек Континуиран тек со „влечење“ („pull“)	Kanban, One-piece flow, Heijunka [165]
Залихи Производство во вистинско време и количина	Just in Time, Kanban, Систем на супермаркет
Мерење на учинок Се мери преку севкупни показатели за ефикасност и додадена вредност	Клучни показатели за учинокот, OEE/OLE, SQDC табли [161]
Начин на анализа Во реално време	Gemba, Визуелен менаџмент, Мапирање на тек на вредности (VSM)
Клиенти Фокус на тоа што го бара клиентот	Гласот на клиентот (VOC), Тактно време [161]

Сепак, ова не се сите алатки кои во литературата може да се сретнат како Lean-алатки. Понекогаш и познати алатки или методи за подобрување на продуктивноста се сметаат за Lean-алатки, па затоа општо прифатено е дека листата со вакви алатки не е конечна и сите алатки кои се поддршка на Lean принципите, може да ги наречеме и Lean-алатки.

3.2. Врска помеѓу Lean и дигиталните технологии

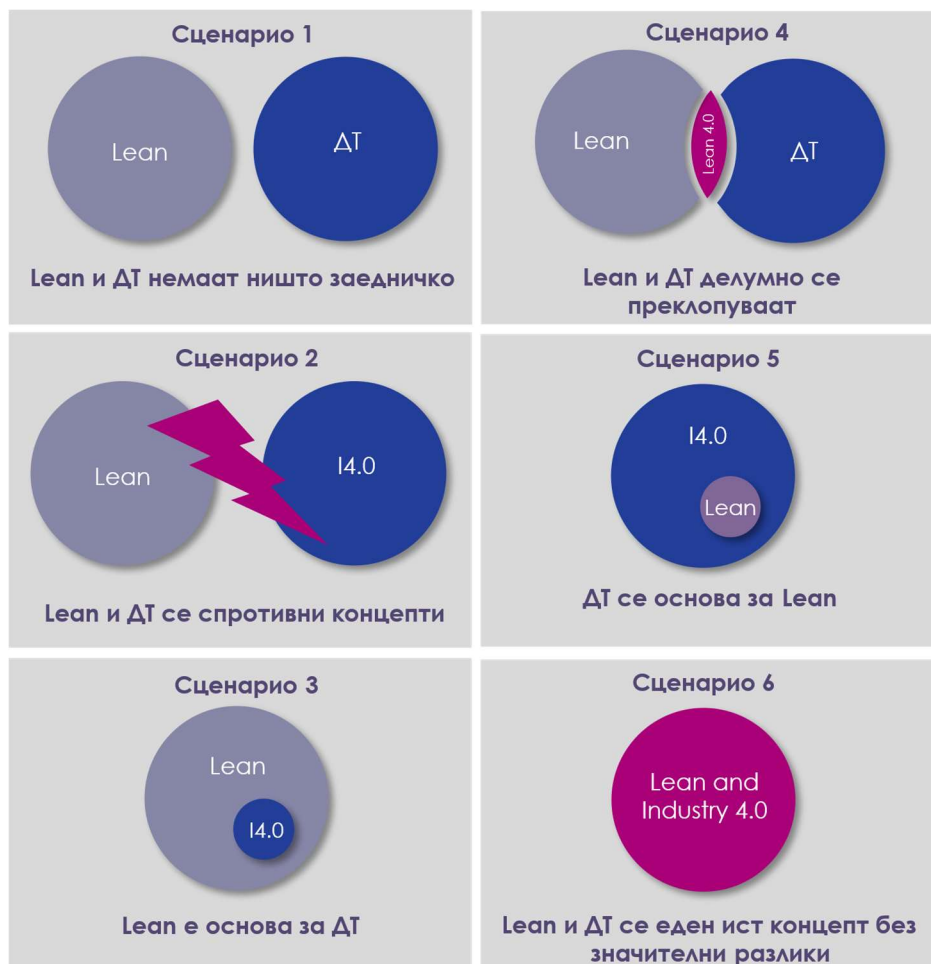
Lean менаџментот, поради својата широка распространетост и прифатеност од страна на најголемиот дел од производствените компании, претставува посебен интерес кога е во прашање неговото прилагодување на промените. Иако Lean е отворена филозофија и успешно опстојува како таква доста долго, сепак неизбежно е да се постави прашањето за неговата интеракција со новите концепти на И4.0 и дигитална трансформација. Во голем број на трудови од 2018 до 2022 се забележува преглед на врската помеѓу Lean и Индустрија 4.0, но различните мислења на авторите на оваа тема сè уште ја прават истата интересна за истражување. Факт е дека голем број на организации од различни сектори вложиле значителен напор и ресурси во имплементација на Lean филозофијата. Сепак, со оглед на брзиот технолошки развој, станува јасно дека или Lean мора да претрпи промени за да одговори на барањата на Индустрија 4.0, или пак новите дигитални технологии треба да се прилагодат на веќе воспоставените Lean стандарди [166], [167], [168]. Слика 3.8, прилагодена според [169], начелно ја илустрира филозофијата на односот помеѓу Lean и Индустрија 4.0 во текот на времето. Оваа илустрација има за цел да покаже дека, природно, овие два концепти, и според дефинициите, треба да се стремат кон симбиоза, но тој пат е постепен и исполнет со организациски, технолошки и културни предизвици.



Слика 3.8 Концепт на зрелост на врската помеѓу Lean и дигиталните технологии

Првата фаза во овој модел на зрелост е „Игнорирање“ - фазата во која двата концепти функционираат одделно без да се прават обиди за нивното интегрирање. Со оглед на почетните разлики помеѓу двата модели (Lean е исплатлив и ориентиран кон луѓето, додека И4.0 е скап и се стреми кон автономни машини), логично е да се очекува фаза на „Конфликт“ помеѓу овие два концепта, што е и причина за големиот број на трудови на оваа тема. Може слободно да се каже дека и научната заедница и индустријата би можеле да ја класифицираат моменталната состојба на овој однос како „Здружување“ со оглед на интензивната работа која води кон имплементација на Lean алатките и методите со помош на дигиталните технологии. Последната фаза „Симбиоза“ е следниот логичен чекор каде стратегијата за имплементација на Lean и Индустрија 4.0 би била единствена и со една заедничка цел и ресурси кои одговараат и на двата концепти.

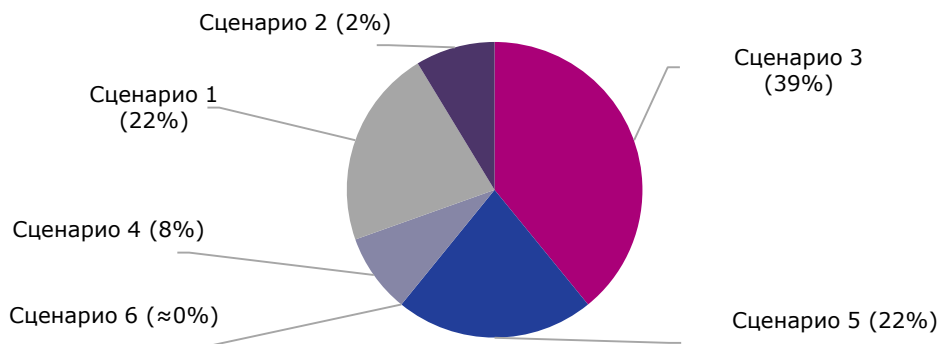
Во литературата идентификувана е една сеопфатна листа на типовите на врски помеѓу Lean и дигиталните технологии на Индустрија 4.0 [170]. На Слика 3.9 дадена е проширена сопствена интерпретација на типовите на врски. Оваа илустрација понатаму служи за преглед на литературата за тоа дали постојат наоди кои ги поддржуваат овие типови на врски [171].



Слика 3.9 Типови на врски помеѓу Lean и Индустрија 4.0

Во [171], направен е детален преглед на мислењата на авторите и нивна класификација на едно од горенаведените сценарија. Резултатите се презентирани на Слика 3.10.

Класификација на литературата за врската помеѓу



Слика 3.10 Анализа на застапеност на концептите на интеракција на Lean и И4.0 во литературата

Дијаграмот на Слика 3.10 го прикажува процентот на трудови кои се согласуваат со едно од шесте можни сценарија според [170] за односот помеѓу Lean и И4.0. За време на прегледот на литературата, беше забележано дека повеќето автори (~40%) изјавуваат дека Lean е потребната основа за имплементација на новите дигитални технологии. Ова е сосема очекуван резултат со оглед на комплексноста на дигиталните технологии. Многу е важно секогаш кога производителите ги подобруваат своите постоечки процеси со некои од дигиталните технологии, овие процеси претходно да бидат оптимизирани (загубите да се елиминираат), за да можат побрзо и полесно да ја прифатат трансформацијата. Сепак, забележано е дека многу од овие автори сè уште мислат дека ова не е конечна и единствена дефиниција на односот, туку таа зависи од условите во организацијата, како и од видот, големината, географскиот регион на организацијата итн. Од друга страна, 22% од трудовите и извештаите наведуваат дека Индустрија 4.0 е основата за Lean процесите. Околу 8% од авторите веќе работат со интегрираниот концепт Lean 4.0, што значи дека успеале да најдат одредени заеднички аспекти помеѓу двата концепти (Сценарио 5).

22% наведуваат дека нема потреба од поврзување на Lean и Индустрија 4.0 бидејќи тие се различни концепти. Ова главно произлегува од различните дефиниции во врска со овие теми. Некои од авторите ја гледаат Индустрија 4.0 едноставно како период што започнал веднаш по третата индустриска револуција, и исто како и претходните три револуции, ова ќе трае одредено време пред да се трансформира во Индустрија 5.0. Многу автори веќе ја споменуваат и се обидуваат да ги постават темелите Индустрија 5.0, но како што претходно е дискутирано во поглавјето 2.2, овој концепт сè уште е далеку од популарноста на Индустрија 4.0.

Иако е многу мал процентот, постојат автори кои сметаат дека Lean и Индустрија 4.0 се спротивставени концепти. Ова мислење се чини дека е поврзано со фактот дека Lean е процес во голема мера потпомогнат од човекот, а Индустрија 4.0 е фокусирана на дигитализација и автоматизација. Некои исто така наведуваат дека основата на Lean се луѓето, но со оглед на високото ниво на автономија наметнато од новите Индустрија 4.0 технологии, се очекува дека потребата од работна сила ќе се намали. Третиот аспект што обично се дискутира се трошоците за имплементација. Иако Индустрија 4.0 е скапа инвестиција, Lean се стреми континуирано да ги подобрува производите и процесите со минимални инвестиции.

И покрај тоа што ваквата анализа обезбедува приказ и подобро разбирање на доминантните перспективи за интеракцијата помеѓу Lean и Индустрија 4.0, сепак има и

ограничувања бидејќи класификацијата се базира на субјективна интерпретација на ставовите на авторите во литературата, која често користи различна терминологија, контекст и истражувачки пристапи.

Според погорната дискусија, доколку се навратиме на Слика 3.8, може да се каже дека врската помеѓу Lean и дигиталните технологии на Индустрија 4.0 сè уште нема постигнато симбиоза, па науката треба сепак да продолжи со барање на врските помеѓу двата концепти.

Доколку го разгледуваме тврдењето на авторите дека Lean е основа за имплементација на дигиталните технологии, интуитивно можеме да дојдеме до заклучоци за поврзаноста на триото на Индустрија 4.0 и на Lean. Имено, Lean принципите ја потпомагаат имплементацијата на технологиите, а технологиите го потпомагаат редуцирањето или целосното исфрлање на загубите во производството. И двете парадигми на крајот се стремат кон истите цели што е основа за нивната синергија. Оваа логика е визуелизирана на Слика 3.11.



Слика 3.11. Логика на симбиозата на Lean и дигиталните технологии

Со цел да се направи продлабочена анализа, во Табела 3.5 дадена е анализа на вкрстени влијанија. По логиката од Слика 3.11. Логика на симбиозата на Lean и дигиталните технологии, најпрво за тоа колку Lean може да ја поддржи имплементацијата на дигиталните технологии. Односите се оценувани знаковно, притоа „+“ значи силна врска, „++“ значи делумна врска, а „-“ значи дека нема значајна врска.

Табела 3.5. Анализа на влијанија помеѓу Lean принципи и дигитални технологии

Технологии	Принципи					
	Дефинирање на вредност	Мапирање на тек на вредности	Креирање на тек	Дефинирање на влечење	Стремеж кон совршенство	Вкупно +
Големи податоци и аналитика	+	+	+	+	++	6
Интернет на нештата	+	++	++	+	+	7
Автономни роботи	-	++	++	-	+	5
Облак	-	-	+	-	+	2
Адитивно производство	+	-	+	++	-	4
Проширена реалност	-	++	+	-	+	3
Системска интеграција	+	+	++	+	+	7
Сајбер безбедност	-	-	-	-	+	1
Симулации	-	+	+	-	+	3
Вештачка интелигенција	+	+	+	+	++	6
Сајбер-физички системи	+	++	++	+	+	7
Вкупно +	5	11	12	5	10	

Анализата на матрицата на овозможување укажува на јасна поврзаност помеѓу Lean принципите и имплементацијата на дигиталните технологии. Од збирните резултати по

колони може да се забележи дека третиот принцип „Креирање на тек“ има највисока вкупна вредност, што го позиционира како најзначаен поддржувач на имплементацијата на дигиталните технологии. Ова е и очекувано, бидејќи воспоставувањето стабилен и непречен тек на процесите претставува основен предуслов за ефективно воведување на многу дигитални технологии. Голем дел од технологиите на Индустрија 4.0, како што се интернетот на нештата, системската интеграција или сајбер-физичките системи, се потпираат на континуиран проток на податоци и стабилност на процесите, што е главната цел на овој принцип.

Веднаш по него се издвојува и вториот принцип „Мапирање на тек на вредности“. Овој принцип придонесува за подобро разбирање на процесите, идентификација на критичните точки и дефинирање на местата каде што дигиталните технологии можат да создадат најголема вредност. Преку систематско мапирање на процесите се олеснува изборот и насочувањето на технологиите кон активности кои имаат најголем потенцијал за подобрување. Поради фокусот на специфични точки, тука издвоени се и технологии кои во основа се и локализирани и можат да функционираат индивидуално „во една точка“ во процесот, како на пример сајбер-физичките системи, интернетот на нештата, проширената реалност и роботите. Значајна е и улогата на петтиот принцип „Стремеж кон совршенство“, кој е поврзан со културата на континуирано подобрување. Овој принцип претставува важен предуслов за примена на технологии како големи податоци и аналитика, бидејќи тие се базираат на систематско собирање и анализа на податоци за мерење на перформансите и идентификување можности за подобрување. Доколку во организацијата не постои ориентација кон континуирано подобрување, тогаш самото собирање и анализа на податоци има ограничена вредност. Од друга страна, стремезот кон постојано подобрување природно создава потреба од подетално мерење и анализа, што ја нагласува улогата на дигиталните технологии базирани на податоци.

Вториот аспект што ќе се анализира, согласно логиката прикажана на Слика 3.11. Логика на симбиозата на Lean и дигиталните технологии, е врската помеѓу дигиталните технологии и нивното потенцијално влијание врз елиминирање на загубите од Lean, со цел да се добие појасна перцепција дали и на кој начин овие технологии придонесуваат кон нивното отстранување. Резултатите од анализа на вкрстени влијанија е дадена во Табела 3.6.

Табела 3.6. *Анализа на вкрстени влијанија помеѓу дигитални технологии и Lean загуби*

Технологии \ Загуби	Шкарт	Прекумерна обработка	Прекумерно производство	Чекање	Транспорт	Залихи	Движење	Неискористен талент	Вкупно +
Големи податоци и аналитика	++	+	+	+	-	+	-	+	7
Интернет на нештата	++	+	+	++	-	+	-	+	8
Автономни роботи	+	+	-	+	+	-	++	-	6
Облак	-	+	-	+	-	+	-	+	4
Аддитивно производство	+	-	++	-	+	++	-	+	7
Проширена реалност	+	+	-	+	-	-	++	++	7
Системска интеграција	++	+	+	++	+	+	-	+	9
Сајбер безбедност	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Симулации	+	+	+	+	+	+	-	+	7
Вештачка интелигенција	++	+	+	++	-	+	-	+	8
Сајбер-физички системи	++	+	+	++	-	+	-	+	8
Вкупно +	14	9	8	13	5	10	6	9	

Матрицата покажува дека од аспект на технологиите, системската интеграција има најголем вкупен потенцијал за намалување на Lean загубите, по што следуваат интернетот на нештата, вештачката интелигенција и сајбер-физичките системи. Ова укажува дека технологиите кои овозможуваат поврзаност, размена на податоци и координација помеѓу системите имаат најзначајна улога во елиминирањето на загубите во производните процеси. На пример, кај системската интеграција е забележана силна врска со чекањето како загуба, што е логично бидејќи интегрираните информациски и производни системи овозможуваат подобра синхронизација на операциите и навремено пренесување на информации, со што се намалуваат застоите и неусогласеноста помеѓу процесите. Очекувано е сајбер безбедноста да нема директно влијание врз намалувањето на Lean загубите, бидејќи нејзината примарна улога е заштита на податоците и системите, а не оптимизација на процесите и индиректно влијае на ефикасноста на производството.

Од аспект на загубите, најголем потенцијал за намалување имаат шкартот и чекањето, што укажува дека дигиталните технологии најсилно придонесуваат за подобрување на квалитетот и синхронизацијата на процесите. Во матрицата се забележуваат и неколку силни поединечни врски кои го потврдуваат ова. На пример, кај загубата прекумерно производство се јавува силна врска со адитивното производство, бидејќи оваа технологија овозможува производство по потреба и во мали серии, со што се намалува потребата од прекумерно производство и складирање. Слично, кај загубата движење, силна врска се забележува со автономните роботи, кои овозможуваат автоматизација на физичките операции и намалување на непотребните движења на извршителите.

Резултатите од двете матрици укажуваат на силна комплементарност помеѓу Lean принципите и дигиталните технологии. Првата матрица покажува дека Lean создава основа за нивна успешна имплементација. Голем број од технологиите имаат силна или делумна врска со принципите. Втората табела покажува дека дигиталните технологии значително придонесуваат за намалување на Lean загубите, при што тука, освен сајбер-безбедноста, сите други технологии имаат силно или високо влијание на загубите.

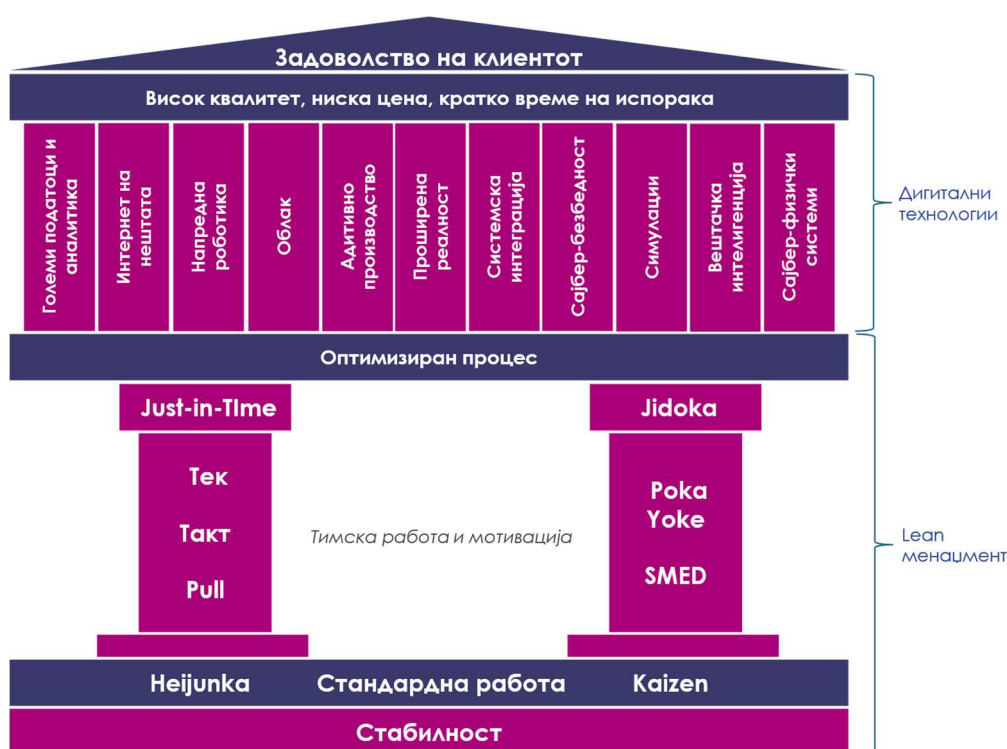
3.4. Согледувања и заклучоци

Од извршената анализа може да се заклучи дека Lean принципите и дигиталните технологии не претставуваат одвоени концепти, туку комплементарни пристапи кои меѓусебно се зајакнуваат. Lean обезбедува јасна ориентација кон елиминација на загубите, создавање вредност и стабилизирање на процесите, додека дигиталните технологии овозможуваат повисоко ниво на транспарентност, автоматизација и интелигентно управување со производствените системи. Анализата на нивните меѓусебни врски покажува дека Lean принципите често претставуваат предуслов за ефективна имплементација на дигиталните технологии, бидејќи без оптимизирани и стабилни процеси дигитализацијата може да доведе само усложнување на процесите и дополнително нагласување на загубите.

Истовремено, дигиталните технологии значително го прошируваат потенцијалот на Lean пристапот преку подобрување на следењето на процесите, побрзо донесување одлуки и повисоко ниво на флексибилност и квалитет во производството. Токму оваа синергија укажува дека дигиталната трансформација во производствените компании не треба да се разгледува изолирано од Lean менаџментот, туку како негово логично надградување.

Поради тоа, во следното поглавје се предлага рамка за имплементација на дигиталната трансформација базирана на Lean принципите, која има за цел систематски да ги интегрира организациските, процесните, човечките и технолошките аспекти на трансформацијата и да обезбеди структуриран пристап за успешно воведување на дигитални технологии во производствените системи.

За да се заокружи ова поглавје, спроведените анализи на врските, како и прегледот на литературата, укажуваат дека Lean процесите во претпријатието треба да претставуваат предуслов за имплементација на дигиталните технологии. Ова произлегува од силните овозможувачки врски на Lean принципите кон дигиталните технологии, како и од значајното влијание на дигиталните технологии врз намалувањето на Lean загубите. Поради тоа се предлага модификација на Lean куќата, прикажана на Слика 3.5. Со цел ова визуелно да се претстави, се предложува е модификација на куќата на Lean, дадена на Слика 3.12.



Слика 3.12 Куќа на Lean 4.0

Со преминот од традиционален Lean кон Lean 4.0 (Lean Индустрија 4.0), се појавува можност класичната куќа на Lean да се надгради со вклучување на дигиталните технологии. Главниот предизвик е Lean да остане основа на производниот систем поради своите докажани ефекти. Технологијата треба да биде поддршка, а не замена за веќе воспоставените Lean филозофии. Во оваа нова куќа, столбовите на Индустрија 4.0 се поставени како второ ниво и се потпираат на веќе воспоставените Lean практики во компаниите.

Истата логика може да се аплицира и на архитектура на системите во Индустрија 4.0 е позната и како „пирамида на автоматизацијата“ [172]. Во пракса не постои јасно утврден редослед за имплементација на технологиите од Индустрија 4.0, па често организациите воведуваат сложени системи, како на пример ERP системи, без целосно да ја следат оваа структура. Бидејќи архитектурата сè уште не е строго стандардизирана, постои можност на пирамидата да ѝ се додаде уште едно основно ниво, Lean, согласно

анализите погоре. Иако ова е концептуален предлог, идејата е Lean културата постојано да биде присутна како темел при искачувањето кон повисоките нивоа на дигитализација.

Предложената трансформација на Слика 3.13, според [173], вклучува и принцип на континуирано подобрување на сите нивоа од пирамидата.



Слика 3.13 Трансформација на архитектурата на системите на Индустија 4.0

Во моделот е додадено основно „ниво на култура“, каде што се поставени Lean алатките и техниките. Ова ниво има цел да изгради Lean начин на размислување и култура насочена кон елиминирање на загубите и подобрување на процесите, со што се овозможува полесна и поодржлива надградба кон повисоките нивоа.

4. РАМКА ЗА ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА НА ДИГИТАЛНА ТРАНСФОРМАЦИЈА

Ова поглавје го прикажува систематскиот пристап за конципирање, структурирање, евалуација и документирање на рамката за имплементација на дигиталната трансформација базирана на Lean менаџмент.

Од литературата прегледана во претходното поглавје, особено во делот што ги разгледува релациите помеѓу Lean и дигиталните технологии, може да се констатира постоење на истражувачки јаз во поглед на унифициран став на авторите. Иако голем број автори ја потенцираат нивната меѓусебна поврзаност, сè уште не е постигната целосна симбиоза на двата поими. Понатамошните напори во ова истражување ќе се насочат кон создавање на врски помеѓу овие два поими, најпрво преку развој на рамка за интегрирана имплементација на дигитална трансформација базирана на Lean, но и преку мерење на влијанието на дигиталните технологии на показателите кои вообичаено се поврзуваат со Lean во производството, со цел емпириски да се покаже дека истите имаат релација која може и квантитативно да се изрази преку избрани показатели.

Универзално прифатена дефиниција за терминот „рамка“ („framework“) не постои. Дефиницијата и целите на една рамка можат значително да се разликуваат во зависност од дисциплината и тематската област во која се применува. Преводот на македонски јазик, според Дигиталниот речник на македонскиот јазик, каде се нудат три варијанти за тоа како треба да се преведе терминот (рамка). „Cambridge Dictionary“ ја претставува рамката како „потпорна структура околу која може да се изгради нешто; систем од правила, идеи или верувања што се користи за планирање или одлучување“ [174]. Дополнително, „Merriam-Webster Dictionary“, рамката ја дефинира како „основна концептуална структура“. Од сите дефиниции може да се извлече дека рамката дава:

- општи насоки за дефинираната проблематика,
- основана структура околу која може да се изгради нешто,
- правила, идеи и верувања што помагаат при планирање и одлучување,
- можност за прилагодување на потребите на корисникот.

За развој на рамката, во оваа дисертација ќе бидат користени добри практики според [175], што во основа е поедноставена верзија на фундаменталниот метод за развој на рамки, „Design Science Research Method“ (DSRM) [35], [176]. Во Табела 4.1, дадени се фазите на двата разгледани методи со споредба која покажува дека методите во основа се состојат од истите фази, па поради поедноставување, понатаму низ трудот ќе се продолжи со вториот метод.

Табела 4.1 Споредба на методите за дизајн на концептуална рамка

Метод 1 [35], [176]	Метод 2 [175]	Дефиниција
Проблем и мотивација	Конципирање	Утврдување на потребата, дефинирање на проблемот и разјаснување на целта пред да започне развојот на рамката.
Дефинирање на целите	Структурирање	Креирање на почетна верзија на рамката преку дефинирање на барања, решенија и нивно интегрирање.
Дизајн и развој	Евалуација	Евалуација преку експертска и/или корисничка евалуација со цел формална проценка во однос на целите, со можна итерација кон претходната фаза.
Демонстрација	Документирање	Финализирање на документацијата за користењето на рамката и дисеминација на резултатите.
Евалуација		
Споделување		

Пред да се постават очекувањата за рамката, важно е да се дефинираат и термините “framework”, “methodology” и “roadmap” кои многу често во англискиот (но и во македонскиот јазик) се користат наизменично, иако има разлика помеѓу нив. Главно во деталноста и строгоста во следење на дефинираните фази и активности. Рамка (framework) и методологија (methodology) се слични по значење, но рамката е општа и дава простор за интерпретација од корисникот, за разлика од методологијата каде активностите/методите се точно дефинирани. Патоказот (roadmap), може да се користи во различни контексти, сличен е со претходните по тоа што има фази и активности, но главната цел е да даде редослед на помали проекти.

Според методот за развој, на почеток се врши конципирање преку дефинирање на потребите и проблемите што рамката треба да ги адресира, како и формулирање на нејзините цели. Понатаму, се прикажува процесот на структурирање кој вклучува идентификација на барањата, дефинирање на решенија за барањата и нивно интегрирање во логичен тек. Следува фазата на евалуација, во која рамката се верификува преку избран метод за верификација (експертска анализа, бенчмаркинг и сл.). Во завршниот дел, се претставува финалната концептуална рамка, заедно со целосна документација потребна за користење на рамката. Табела 4.2 дава преглед на активностите, влезите и излезите во фазите на избраниот метод за развој на рамката.

Табела 4.2 Преглед на активностите во фазите на развој на рамката

Фаза	Активност	Влез	Излез	Алатки
Конципирање	A1 - Дефинирање на потребата и проблемот	Изјава за потребата Изјава за проблемот	Документирани потреби Документирани проблеми	Преглед на литература, mind-map, бура на идеи
	A2 - Поставување на целта	Потребности Проблеми	Поставување на целта Концепт-документ (ФК, АК, ОИ)	
Структурирање	A3 - Дефинирање на барањата	Концепт-документ	Документирање на барањата	Преглед на литература
	A4 - Решенија на барањата	Барања	Документирање на решенијата Интеграција на решенијата и барањата	
	A5 - Интеграција на решенијата и барањата	Решенија на барањата	Прва верзија на рамката	
Евалуација	A6 - Бенчмаркинг	Прва верзија на рамката	Оперативна верзија на рамката	Интервјуа, прашалници, прототип, симулации, експерименти
	A7 - Експертска евалуација	Оперативна верзија на рамката	Финална верзија на рамката	Експертско мислење
Документирање	A8 - Документација на рамката	Финална верзија на рамката	Документација за рамката	Презентации, мултимедија, упатства за разбирање, користење, одржување и обновување на рамката

4.1. Конципирање

Фазата на конципирање претставува прв и суштински чекор во развојот на нова рамка. Во неа се деталзира проблемот и се дава оправдување за предлог-рамката во

контекст на потребата од истата. Оваа фаза има две клучни улоги во процесот на истражување. Прво, таа служи како основа за мотивирање на истражувачот и засегнатите страни за реализација на предложеното решение преку јасно дефинирање на потребите и идентификување на проблемите. Второ, фазата им овозможува на засегнатите страни подетално да ја разберат сложеноста на проблемот, како и степенот на познавање и пристап на истражувачот кон истиот. Фазата на конципирање се состои од две главни активности, според Табела 4.2 Преглед на активностите во фазите на развој на рамката:

- дефинирање на потребата и проблемот (A1),
- поставување на целта (A2).

4.1.1. Дефинирање на потребата и проблемот

Главниот предмет на интерес, односно дигиталната трансформација на производствените претпријатија, претставува централна почетна точка од која започнува процесот на размислување при дефинирањето на потребата и проблемот. Со цел да се воспостави почетна структурираност на анализата, изработено е „мапирање на умот“ (анг. „mind-map“), прикажано на Слика 4.1, кое дава почетни насоки на размислување на авторот кога е во прашање предметот на интерес, базирани на претходните истражувања и искуства.



Слика 4.1 “Mind map” за предметот на истражување

Слика 4.1 дава и почетно групирање на мапираните теми, по што проблемот кој ќе биде разработен во понатамошниот текст ќе биде објаснет преку три извори на истиот (уште познати како „Triple Helix“ модел [177]). Овие три извори ќе го дадат и главното објаснување на потребата, односно научниот јаз во овој труд:

- **академијата → нема консензус за врската и начинот на интеграција на Lean и дигитална трансформација во производството** - иако од прегледот на литературата јасно е дека и двата концепти треба во најмала рака паралелно да бидат негувани, постои недостиг на интегриран пристап кој истовремено ги опфаќа Lean принципите и дигиталната трансформација, што резултира со изолирана и неповрзана имплементација на овие концепти,
- **индустријата → има висока стапка на неуспешност на проектите за дигитална трансформација поради голем број на предизвици од различна природа** - недостаток на сеопфатен пристап кој ги адресира предизвиците при имплементацијата на дигиталната трансформација, особено во производствениот сектор кај екосистеми со ниска дигитална зрелост,

- државата → нема структуриран и сеопфатен начин за имплементација и мерливост на веќе дефинираните стратегии поврзани со дигитална трансформација во претпријатијата со ниска дигитална зрелост - иако стратегиите го потенцираат проблемот со ниската дигитална зрелост на компаниите, сепак практичната примена и видливите резултати недостасуваа, посебно кај МСП кои немаат доминантен странски капитал и знаење, при што се јавува погрешна претстава за успешноста во имплементацијата на дигиталната трансформација.

Слика 4.2 го илустрира на претворањето на проблемите во потреби кои треба да ги задоволи рамката за дигитална трансформација.



Слика 4.2 Поврзаност на проблемите и потребите

Во продолжение следуваат дополнителни објаснувања на трансформацијата на проблемите во потреби кои треба да ги исполни рамката за дигитална трансформација.

4.1.1.1. Интегриран пристап кон Lean и дигитална трансформација

Дигиталната трансформација во производствениот сектор сè повеќе се препознава како неопходен процес за зголемување на продуктивноста, и со тоа конкурентноста на компаниите. Сепак, во контекст на современото индустриско работење, постои јасна потреба да се разгледа нејзината врска со веќе воспоставените менаџерски филозофии, како што е Lean менаџментот.

Во контекст на Lean, претпријатијата кои ја започнуваат својата дигитална трансформација, можат да се најдат во две ситуации:

- ситуација 1: Lean се практикува,
- ситуација 2: Lean не се практикува.

При првата ситуацијата, дигиталната трансформација не би требало да ги наруши веќе воспоставените Lean принципи (до кое ниво и да се имплементирани истите), напротив треба да придонесе до понатамошно одржување на поставените стандарди и да обезбеди континуирано подобрување. Ова е генерално најлесно сценарио при имплементација на дигиталната трансформација, каде Lean културата веќе владее, а напорите за континуирано подобрување сега треба да се ориентирани кон подобрување на процесите преку дигитални технологии.

Втората ситуација отвора прашање дали дигиталната трансформација може да успее пред целосна имплементација на Lean. Одговорот на ова прашање може да се добие преку дефинирање на вредноста која и двете ја носат на компанијата. Lean носи бизнис вредност преку создавање на култура на стандарди и континуирано подобрување, додека

дигиталната трансформација носи бизнис вредност преку интеграција на нови технологии во околина која веќе има високо ниво на знаење и отвореност кон промени. Според ова, Ситуацијата 2 има три потенцијални решенија:

- одделна (независна) имплементација на Lean и ДТ,
- Lean е почетна и задолжителна фаза при имплементација на ДТ,
- интегриран пристап при имплементацијата на Lean и ДТ.

Јасно е дека доколку дигиталната трансформација ја гледаме како еден екстензивен портфолио проект, интегриран пристап кон двете е секогаш најпосакуваниот пристап пред сè поради оптимизација на ресурсите (на пр. време и тим).

И Lean и ДТ имаат одредени алатки кои треба да се имплементираат, но не постои конечна листа на ваков сет на алатки. Lean пред сè ги има своите принципи кои не даваат точна листа на алатки кои мора да бидат користени за еден принцип да се смета за имплементиран, туку практичарите имаат слобода во однос на ова. Кај дигиталната трансформација, постојат слоевите на ДТ кои треба да бидат подеднакво застапени со цел таа да биде успешна, но листата на алатки/методи, повторно, не е стандардизирана. И кај двата пристапи, ова дава голема флексибилност при имплементацијата, но претставува и голема пречка за компаниите кои се наоѓаат во ситуација на тешко определување на почетната точка за трансформација. Од тука често се јавува и една од најголемите заблуди при имплементирањето на Lean и дигитална трансформација т.е. нивно парцијално имплементирање преку ограничен број на алатки и верување дека компанијата е Lean или дигитално трансформирана без следење на принципите на двата концепти.

Од овде може да ги извлечеме и трите задолжителни аспекти кои и независното и интегрирано имплементирање на Lean и ДТ треба да ги содржи: јасна патека активности за имплементација, интеграција на Lean-размислувањето и принципите при имплементацијата, и активности во сите слоеви на дигиталната трансформација за истата да биде сеопфатна.

И покрај овие логични заклучоци, во академските публикации сè уште не постои консензус за интеракцијата на Lean и дигиталната трансформација, ниту пак рамка за дигитална трансформација која го олеснува имплементирањето на едно од потенцијални решенија дискутирани погоре. Во продолжение изложени се објаснувања на аспекти како Lean не е (доволно) вклучен во иницијативите за дигитална трансформација, односно објаснување зошто истиот треба да биде интегриран дел од дигиталната трансформација, иако е јасно дека ваквата интеграција би имала позитивно влијание на напорите за дигитална трансформација. Оваа потреба од вклучување на Lean размислување во процесот на дигитална трансформација најдобро го прикажува и истражувачкиот јаз на овој докторски труд. Претходните истражувања на оваа тема се направени во две насоки со цел:

- барање на консензус за врската помеѓу Lean и дигиталните технологии,
- барање на рамка која ја поддржува интегрираната имплементација на Lean и дигитална трансформација.

Иницијалната идеја за потребата потекнува од претходно изложеното истражување (Поглавје 3) каде се потврдува дека согласно најголем дел од авторите, Lean практиките во производствените компании се претходник или основа на напорите за дигитална трансформација (39% од авторите). Исто така, доста голем дел од авторите сметаат дека иницијативите за Lean и дигитална трансформација може да се развиваат како паралелни

процеси, првенствено поради нивната независност еден од друг (22% од авторите) или поради нивната заедничка цел, при што го формираат новиот концепт на Lean 4.0 (8% од авторите). Голем дел од авторите (22%) сметаат дека дигиталните технологии се основата во врска помеѓу Lean и дигитална трансформација, што повторно може да се земе како плус во нивната коегзистенција, иако во неколку наврати претходно и во продолжение на овој докторски труд се изложени ризиците од фокус кон технологија при имплементација на дигитална трансформација (повеќе во поглавјето 3.2). Остатокот од авторите не се позитивно настроени кон ваквата интеграција, т.е. сметаат дека концептите се целосно спротивставени. (8% од изворите). При анализа која се фокусира на Lean, како и една од главните хипотези на трудот, дека Lean е основа и претходник на напорите за дигитална трансформација, последните два ставови може да ги земеме како сили кои спротивно дејствуваат на идејата дека Lean е во основата, но двете перспективи заедно имаат значително помала застапеност во литературата, 29% од изворите, за разлика од позитивно-настроените автори кон интеракцијата на Lean и дигиталните технологии, каде дури 71% се сложуваат дека овие два концепти треба да имаат некаква интеракција во која Lean како традиционален пристап кон оптимизација е првиот чекор, или барем чекор кој е интегриран во рамката за дигитална трансформација.

4.1.1.2. Постоечки рамки за дигитална трансформација

Со цел да се добијат проширени знаења за рамките за имплементација на дигитална трансформација во производството, но и да се одреди истражувачкиот јаз и фокусот на рамката, селектирани и прегледани беа вкупно дванаесет литературни извори кои обработуваат рамки за имплементација на дигитална трансформација, вклучувајќи и рамки за имплементација на И4.0 и паметно производство, поради релативно малиот број на рамки кои конкретно се занимаваат со имплементација на дигитална трансформација во производството.

Во посебно истражување на авторот на [20], презентирана споредба на постоечките рамки согласно неколку критериуми: фази/чекори, област на примена, тип, животен циклус, вклученост на модел на зрелост и вклученост на Lean принципите. Проширена анализа во однос на трудот дадена е во продолжение во Табела 4.3.

Рамките можат да бидат теоретски (комбинирање на концепти и постоечка теорија) или концептуални (единство на концепти за одредена студија). Рамките можат да бидат и од стратешки тип - оние што се поврзани со дизајнирање или следење на одредена организациска стратегија, или процедурален тип - оние што се поврзани со управувањето со одредени активности. Некои автори ги вклучуваат моделите на зрелост во групата рамки за имплементација на дигитална трансформација и Индустија 4.0 [178].

Ова прашање претходно беше опширно истражено од страна на авторот во [19]. Наодите од прегледот на литературата укажуваат на недостаток на документирани методологии и модели на имплементација поврзани со дигиталната трансформација во производствениот сектор кои поддржуваат интегрирана имплементација и на Lean принципите. Ова укажува дека многу производствени компании се борат да разберат како да пристапат кон имплементацијата или дури и како да го направат првиот чекор.

Табела 4.3 Преглед на постоечки рамки за дигитална трансформација

Извор	Фази/Чекори	Област	Циклус	Lean аспект	Мерење
[15]	Бизнис барања, оперативни барања, интеграција на системската архитектура и бизнис случај, дефинирање и дизајн на потсистеми, дизајн и тестирање на компоненти, тестирање на потсистеми, тест за интеграција на системот, тест на концептот на работа, трансфер на технологијата во редовно работење	И4.0	V-модел	Нема	Нема
[179]	Идентификација на процеси, откривање и анализа на процеси, редизајн и реинженеринг на процеси, поедноставување на деловни процеси, управување со ризици и планирање на непредвидени ситуации, анализа на јазот во вештини, управување со промени, анализа на трошоци и придобивки, валидација на процеси, имплементација на процеси, следење и контрола на процеси	ДТ	Хибриден	Мониторинг и контрола на процеси	Поврзано со анализа на процеси
[24]	Бизнис стратешко планирање, организациска структура, управувачки комитет, процес на приоритизација, инвестициски одлуки, стратешко планирање, буџетирање, известување, капацитет за реакција, менаџерска стратегија	ДТ	Нема	Нема	Нема
[30]	Планирање, анализа, дизајн, развој, имплементација, тестирање, распоредување, одржување	ДТ	Хибриден	Нема	Нема
[18]	Идентификација на двигатели, развој на визија, мисија и цели, развој на патокказ за дигитална трансформација	ДТ	Водопад	Нема	Нема
[28]	Дигитална свесност, дигитална стратегија и патокказ, дигитално усвојување и имплементација, континуирано подобрување на дигиталната трансформација	ДТ	Цикличен	Континуирано подобрување	Нема
[25]	Интегрирана организациска иновација, облак услуги, стратегија за намалување на трошоци, можности за промоција, соработка со други компании, обука и развој на вработени, развој на креативен процес, авторитарно лидерство, организациска клима, размена на информации, подобрување на услуги и производи.	ДТ	Цикличен	Нема	Нема
	Анализа, зрелост за Индустрија 4.0, дефинирање на идна состојба, дефинирање и евалуација на мерки, реализација, дефинирање на проекти	И4.0	Водопад	Lean е во основата	Нема
[180]	Анализа на капацитетите на претпријатието, стратегија за премин кон Индустрија 4.0, иницијални пилот-проекти, евалуација на имплементацијата на проектите, трансформација во дигитално претпријатие/паметна фабрика, планирање на екосистем	И4.0	Хибриден	Lean како поддршка за И4.0	Нема
[181]	Идентификација на производствените податоци присутни во МСП, проценка на подготвеноста за паметно производство, развој на визија за паметно производство прилагодена за МСП, идентификација на алатки и практики за реализација на визијата за паметно производство.	ПП	Водопад	Овозможувач на паметно производство	Нема
[54]	Дефинирање, мерење, евалуација, оптимизација, развој, валидација, имплементација	И4.0	Водопад	Базирана на Lean Six Sigma	Фаза Мерење
[182]	Истражување, анализа, дизајн, развој, имплементација, управување, оптимизација и подобрување, менаџмент на промени	ДТ	Хибриден	Континуирано подобрување	Нема
[183]	Формирање на тим, разбирање на технологиите, развој на визија, поставување цели и стратегии, дискусии со топ-менаџмент, одобрување на стратегија, проценка на дигитална зрелост, идентификација на шанси, идентификација на компаниски капацитети, дискусија со менаџментот, дефинирање на иницијативи, приоритизација, подготовка на бизнис стратегија, дефинирање на проектот, менаџмент на промени, имплементација, одлука за реплицирање или проширување на иницијативите	ДТ	Водопад	Оптимизација на текови	Нема
[26]	Проценка на постоечка состојба, бенчмаркинг, дефинирање идна состојба, анализа на јазови, периодизација и подготовка на бизнис кејс, подготовка на патокказ/план, работилница за препораки, имплементација на план	ДТ	Водопад	Спомнат во определување на идна состојба	Нема

Со цел анализата да се прошири во насока на застапеност на Lean размислувањето во постоечките методологии, следниот логичен чекор е се провери дали истите се имплементирани во ваквите рамки/методологии.

Она што е забележано при анализа и споредба на фазите на постоечките рамки со Lean принципите е тоа дека најголем дел од фазите на овие рамки во суштина одговараат на принципите и ја имаат генерално истата цел. Ова го покажува анализата на постоечките рамки за дигитална трансформација (или слична цел) презентирани во трудот, проширена за уште неколку понови рамки, наспроти принципите на Lean, дадена во Табела 4.4.

Табела 4.4 Застапеност на Lean принципите во постоечките рамки за ДТ

Принципи	[15]	[29]	[24]	[30]	[184]	[180]	[181]	[179]	[182]	[183]	[26]
Дефинирање вредност	✓	-	✓	-	✓	-	✓	✓	-	✓	-
Мапирање на тек на вредности	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
Создавање на тек	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Дефинирање на влечење	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓
Стремеж кон совршенство	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-

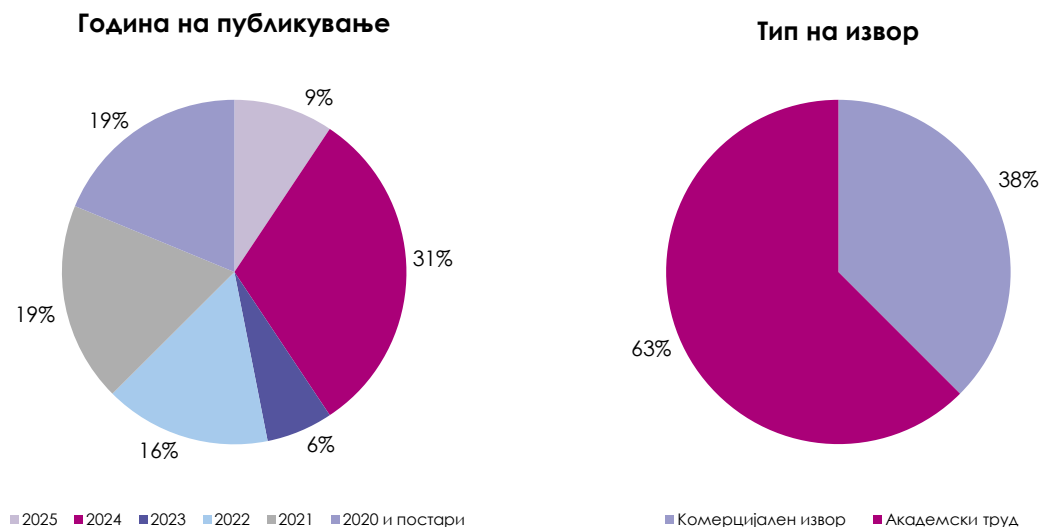
Од оваа анализа може да се види дека принципот Воспоставување на влечење е најмалку застапен во постоечките рамки (во 1 од прегледаните 11 рамки), додека последниот принцип „Стремеж кон совршенство“, со алатки/методи карактеристични за истиот застапен е во 5 од 11 рамки.

Оваа анализа може да се поврзе и со предизвиците кога е во прашање имплементацијата на дигиталната трансформација, односно зошто Lean е вообичаено потребен да биде однапред имплементиран како култура со цел да имаме и успешна трансформација. Во анализата на предизвиците се јавуваат предизвици како „запоставување/игнорирање на барањата на клиентот“, што е во корелација со отсуството на принципот „Дефинирање на влечење“ во рамките за дигитална трансформација.

4.1.1.3. Сеопфатност кон адресирањето на предизвиците за имплементација на дигитална трансформација

Како и секоја друга стратешка и оперативна промена во организациите, и дигиталната трансформација носи свои предизвици. Според извештаи на McKinsey & Company [185], над 70% од проектите за дигитална трансформација се покажуваат како неуспешни, а тоа се должи на генеза од предизвици со кои компаниите се соочуваат.

Трудот [7] дава детален преглед на најчестите предизвици кои се појавуваат во литературата, а се поврзани со имплементацијата на дигиталната трансформација. Дијаграмите на Слика 4.3 даваат статистички информации поврзани со литературните извори поврзани со предизвиците за дигитална трансформација.



Слика 4.3 Статистички податоци за прегледаната литература

Споменатиот труд ги сумира предизвиците што се споменати во прегледаната литература, како и од консултантски компании што се занимаваат со имплементација на ДТ. Терминологијата во литературата е значително различна во поглед на секој од предизвиците, па за подобро разбирање, предизвиците од најголемо значење се категоризираат на неколку категории, секоја категорија е подетална од претходната со цел да се добие слика за тоа кои под-предизвици се дел од т.н. „главен предизвик“. Табела 4.5 дава почетен преглед за фреквенцијата за појавување на предизвиците во прегледаните литературни извори.

Табела 4.5 Пречки за успешна дигитална трансформација

Бр.	Пречка	Застапеност
1	Недостаток на компетенции и знаење	91%
2	Безбедносни проблеми	72%
3	Недостаток на буџет	69%
4	Несоодветен менаџмент на промени	66%
5	Недостаток/немање на (дигитална) стратегија	59%
6	Недостаток на управување („governance“)	53%
7	Несоодветна (стара) инфраструктура	50%
8	Занемарување на искуството на клиентите	41%
9	Комплексност на технологијата	38%
10	Недостаток на стандардизирани/оптимизирани процеси	34%
11	Недостаток на организациска култура	31%
12	Слаба тимска работа	28%
13	Недостаток на поддршка од менаџментот/лидерите	28%
14	Недостаток на поддршка од владата	25%
15	Слаба дигитална (на податоците) зрелост	22%
16	Фокусирање на технологија	19%
17	Слаб поврат на инвестициите за ДТ иницијативи	16%
18	Недостаток на мотивација	13%
19	Слаба дигитализација на синџирот за снабдување	13%
20	Регулативи и правни фактори кои создаваат пречки	13%
21	Временски ограничувања	13%
22	Недостаток на таленти/луѓе	13%
23	Недостаток на иновации	13%
24	Несоодветен бенчмааркинг/споредба со конкуренцијата	9%
25	Премногу извештаи во текот на проектите	3%
26	Занемарување на одржливост и еколошко влијание	3%

Во трудот е направено рангирање на пречките/предизвиците согласно нивното појавување во литературата т.е. оние кои се појавуваат во најголем процент од изворите се повисоко на листата, а потоа користејќи го правилото 70-20-10, определени се најважните предизвици за понатамошна анализа односно разложување на главните предизвици. Оваа приоритизација е многу важна за овој докторски труд бидејќи самото истражување дефинира голем број на проблеми кои може да се нападат, но јасно е дека решенијата не можат да бидат толку сеопфатни.

Во докторскиот труд, анализата е обновена и надополнета со уште неколку извори во однос на приложениот научен труд. Критериумот по кој предизвиците ќе бидат селектиран за имплементација/адресирање во рамката, ќе биде дискутиран подоцна во делот за структурирање на рамката. Во продолжение дискутирани ќе бидат најгорливите предизвици според табелата:

- **недостатокот на компетенции** се појавува како главен предизвик според прегледот, споменат во дури 91% од прегледаните извори. Тој се однесува на недостатокот на дигитални вештини кај вработените, што подразбира надградување или преквалификација на работната сила. Предизвиците поврзани со јазот во вештини во дигиталната трансформација може да се категоризираат во пет клучни поткатегории според прегледот на литературата. Прво, постои недостаток на општи и специфични ИТ вештини и експертиза, при што организациите се борат да најдат или развијат професионалци со потребните ИТ компетенции. Обуката и развојот треба да ја истакнат важноста на надградување и обука за да се премостат јазовите во дигиталните компетенции. Недостигот на таленти и проблемите со флукуацијата на вработените ја нагласуваат тешкотијата во привлекување и задржување на квалификувани професионалци во рамките на компаниите. Конечно, комуникациските проблеми исто така се поврзани со јазот во вештини, поради тоа дека бизнис и техничките тимови не зборуваат на ист јазик кога станува збор за дигитална трансформација,
- **недостаток на менаџмент на промените** се однесува на способноста на организацијата успешно да ги прифати и имплементира новите начини на работа поврзани со дигиталната трансформација. Отпорот кон промени се јавува кога вработените се несигурни или неподготвени да ги прифатат новите начини на работа и дигиталните решенија. Недостатокот на лидерство и соодветна стратегија за управување со промените негативно влијае врз имплементацијата на трансформацијата, што често резултира со неуспешни проекти и демотивација кај вработените. Дополнително, културните бариери и организацискиот менталитет можат значително да го забават процесот на дигитална трансформација, особено кај организации со отпор кон промени и аверзија кон ризик. Конечно, слабата ангажираност на вработените и игнорирањето на човечкиот фактор претставуваат дополнителна пречка за успешно прифаќање на новите дигитални решенија,
- **недостаток на буџет** претставуваат еден од значајните предизвици во дигиталната трансформација, особено кај претпријатијата од екосистеми со ниска економска и дигитална зрелост. Општите буџетски и финансиски ограничувања ја истакнуваат тешкотијата на организациите да обезбедат доволно средства за реализација на дигиталните иницијативи. Недоволното финансирање дополнително се однесува на ограничените ресурси и високите трошоци поврзани со воведување на нови технологии и технолошки промени. Инвестициските предизвици се поврзани со потребата од значителни вложувања, високите трошоци и незадоволителниот поврат на инвестицијата, што може да ја

намали подготвеноста на организациите за понатамошна дигитализација. Дополнително, како специфичен фактор се појавува и лошото донесување одлуки, кое се однесува на набавка на евтини технолошки решенија што не ги исполнуваат реалните потреби на дигиталната трансформација и можат негативно да влијаат врз нејзината успешна имплементација,

- **недостатокот на (дигитална) стратегија** се однесува на отсуство на јасна насока, план и долгорочна визија за дигиталната трансформација. Дополнително, нејасните цели претставуваат чест проблем, каде организациите немаат прецизно дефинирани очекувани резултати, вредност и приоритети од дигиталната трансформација, што доведува до незадоволителни исходи. Конечно, стратегиската неусогласеност се јавува кај организации кои поседуваат дигитална стратегија, но истата не е усогласена со деловните цели, процесите или реалните потреби на организацијата, што негативно влијае врз успешноста на трансформацијата,
- **недостаток на управување и стандардизирана рамка**, како предизвик се однесува на имплементација на премногу дигитални иницијативи без соодветно планирање и капацитети. Овој предизвик доведува до несоодветни рокови и недостаток на агилност при водење на иницијативите за дигитална трансформација или генерално за проектен менаџмент,
- **недостаток на стандардизирани процеси** опфаќа промена на дигитални алатки без редизајн на процесите, недостаток на оперативна агилност, слаба приоритизација на развојот и несоодветни процедури. Дополнително, проблемите со интероперабилност и стандардизација, нискиот степен на стандардизираност и неефикасните деловни процеси негативно влијаат врз успешната имплементација на дигиталната трансформација,
- **недостаток на организациска култура** се однесува на внатрешната подготвеност на организацијата за прифаќање на промените и дигиталните иницијативи. Според анализираните извори, овој предизвик се одликува со два главни аспекти: моменталната културна подготвеност на организациите и свесноста за дигиталната култура и нејзиниот развој во иднина.

Дел од предизвиците се поврзани со самите технолошки решенија и истите тешко се решаваат со рамка за имплементација на дигитална трансформација која пред сè е насочена кон организациските аспекти на трансформацијата. Такви се безбедносните проблеми, кои често зависат од самата технологија и потребните технички мерки, како и неусогласеноста помеѓу потребните дигитални компетенции и постоечките вештини на вработените. Дополнително, предизвик поврзан со технологиите претставува и несоодветната (стара) инфраструктура, каде организациите најчесто се насочуваат кон ретрофит пристапи поради ограничувањата на постојната опрема. Комплексноста на технологијата и системската интеграција исто така зависат од конкретните технички решенија и нивната меѓусебна компатибилност. Одредени предизвици, како недостатокот на поддршка од владата, се условени од надворешни фактори и политики, додека слабата дигитална зрелост претставува поширок проблем кој бара паралелно адресирање на повеќе аспекти од организацијата. Поради тоа, овие предизвици не можат целосно да се надминат само преку рамка за имплементација, туку бараат дополнителни технички и инфраструктурни решенија.

Со погорните објаснувања не се опфатени ниту предизвиците од реден број 16 до 26 од Табела 4.5, поради нивната мала застапеност во литературата (во под 20% од

изворите). Сепак овие предизвици би можело да се адресираат со цел да се подобрат различни аспекти на рамката.

4.1.1.4. Анализа на постоечки документи и анализи за дигитална трансформација

Со цел да се обезбеди локален аспект за потребата од рамка за дигитална трансформација, анализирани се релевантни стратегии и извештаи кои се однесуваат на територијата на Република Северна Македонија. Иако не постои една сеопфатна научна анализа која директно ја класифицира државата како дел од екосистем со ниска зрелост, различни документи на пониско ниво на дигитална зрелост во споредба со поразвиените европски економии. Неколку од нив ќе бидат презентирани во продолжение, а потоа ќе бидат презентирани и резултати од интерно истражување за зрелоста на производствените претпријатија. Во продолжение се дадени извадоци од три извештаи на Европската комисија кои опфаќаат различни типови на индекси и рангирања поврзани со економијата, дигиталните способности и иновациите.

Споредбата помеѓу просекот на Европската Унија според DESI индексот и показателите за Република Северна Македонија од „Western Balkans Digital Economy and Society Index (WB DESI)“ укажува на значителен јаз во дигиталните компетенции [186]. Додека во Европската Унија 56% од населението поседува најмалку основни дигитални вештини, во Северна Македонија овој процент изнесува 34.6%. Разликата е уште поизразена кај напредните дигитални вештини, каде само 8.2% од населението во државата поседува дигитални вештини над основното ниво, во споредба со 27% во ЕУ. Од друга страна, користењето интернет е релативно блиско до европскиот просек, што укажува дека пристапот до дигитални технологии не претставува главен проблем, туку нивното ефективно користење и развојот на дигитални компетенции. Овие показатели дополнително ја потврдуваат потребата од систематски пристап кон развој на дигитална култура, едукација и поддршка на дигиталната трансформација во македонскиот екосистем.

Според извештајот за 2024 година за „European Innovation Scoreboard“ [187], Република Северна Македонија има пад во кумулативниот индекс на иновативност од 0,8% во споредба со 2023. Сеопфатниот индекс на земјава е 40.0, што е само 40% од просечниот индекс на земјите во Европска Унија, поставувајќи ја на 34то место (од 39 земји опфатени со истражувањето), што повторно ја става во групата со помала зрелост.

Друг показател релевантен за анализата на дигиталната и индустриската зрелост е „Industrial Production Volume Index“ на Европската комисија, кој претставува еден од најзначајните краткорочни статистички показатели за следење на индустриското производство и економскиот развој. Индексот се користи за рано идентификување на промени во економските текови и проценка на идниот развој на БДП, при што претставува дел од т.н. „Principal European Economic Indicators (PEEI)“ за следење на економските политики во Европската Унија [188]. Според достапните податоци, Република Северна Македонија е рангирана на 32 место од вкупно 34 анализирани земји, што дополнително укажува на пониско ниво на индустриски и развоен капацитет во споредба со поголем дел од европските економии.

Од друга страна, истражувања од кои авторот бил дел, исто така покажуваат слаби резултати во поглед на компетенциите и дигиталната зрелост на претпријатијата во

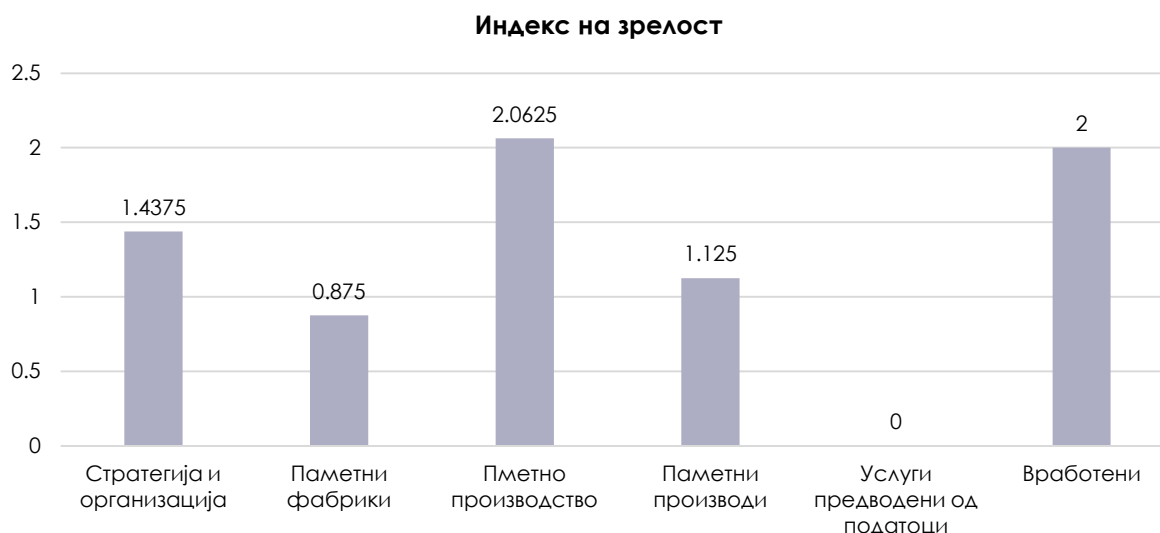
Република Северна Македонија. Овие анализи сепак се однесуваат исклучиво на производствени анализи и за истите нема споредба со резултати од други земји.

Најпрво искористен моделот IMPULS за спремност на претпријатијата за Индустрија 4.0 и дигитална трансформација со цел да се поддржи дефинирањето на потребите и проблемите за развој на новата рамка за дигитална трансформација [189]. Моделот IMPULS, преку серија на прашања во секоја од своите димензии, оценува на кое ниво (од вкупно 6 нивоа) се наоѓа компанијата за која моделот се пополнува. Димензиите се:

- стратегија и организација - јасна дигитална визија и организациска поддршка, во три насоки: стратегија, иновациски менаџмент и инвестиции,
- паметна фабрика - интеграција на технологии и автоматизација: дигитално моделирање, инфраструктура, користење податоци и ИТ системи,
- паметно производство - дигитални алатки за оптимизација: облак, сајбер безбедност, автономни процеси и споделување информации,
- паметни производи - производи со дигитални технологии: ИТ функции и аналитика на податоци во фазата на користење,
- услуги предводени од податоците - услуги создадени преку анализа и користење на податоци,
- вработени - дигитални вештини и подготвеност на работната сила.

Нивоата на кои компаниите можат да бидат рангирани се: Ниво 0 (Аутсајдери), Ниво 1 (почетници), Ниво 2 (Ученици), Ниво 3 (Искусни), Ниво 4 (Експерти) и Ниво 5 (Најуспешни).

Просечните нивоа на зрелост во секоја од димензиите се дадени Резултатите на дијаграмот на Слика 4.4.

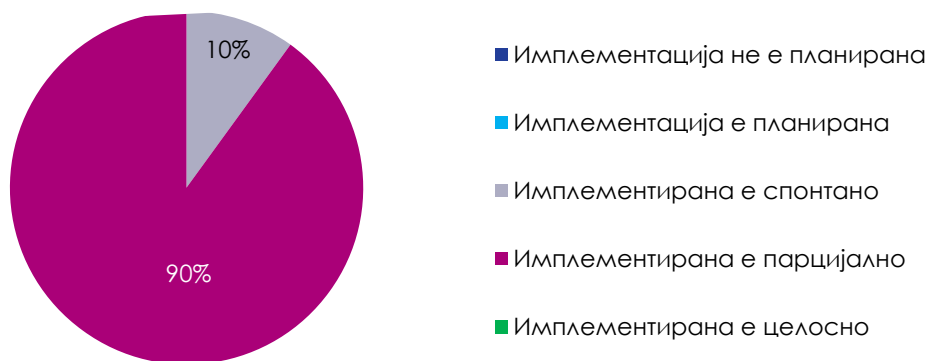


Слика 4.4 IMPULS индекс на зрелост за македонските МСП

Иако резултатите покажуваат дека компаниите имаат одредени активности во области како Паметно производство (2.06) и Вработени (2.0), исто така се гледа дека постојат и критични столбови како Услуги предводени од податоците (0.0) и Паметни фабрики (0.87), кои се послабо развиени. Резултатите покажуваат селективен и фрагментиран пристап кон дигитализацијата, компаниите се фокусираат на луѓето и организациската страна, но ја запоставуваат суштината на дигиталната трансформација:

користење на податоци. Ова создава заблуда дека се дигитално трансформирани, додека во реалноста тие се далеку од интегрирана и целосна дигитализација. При прашалник организиран во рамките на проектот Learn4SMEs - на прашањето „Како би го опишале статусот на дигитализацијата во вашата компанија?“, 90% од малите и средни претпријатија (МСП) одговориле дека дигиталните технологии се делумно имплементирани, што значи дека тие се запознаени со дигиталните концепти. Резултатите се дадени на Слика 4.5, Слика 4.6 и Слика 4.7.

Ниво на имплементација на ДТ во македонските МСП



Слика 4.5 Процент статус на дигитализација на македонските компании

На друго важно прашање, поврзано со нивото на оптимизација на процесите (кое на одреден начин ја адресира и нивната „leanness“), 60% од МСП одговориле дека нивните процеси сè уште не се целосно оптимизирани. Имајќи ги предвид точките изложени во третото поглавје од ова истражување, но и во бројни извештаи и статии кои укажуваат на недостаток на стратешки пристап, ваквите одговори може да се интерпретираат како имплементација на одредени проекти за дигитализација без постоење на Lean процеси, што претставува можен проблем и ризик за неуспех (Слика 4.6).

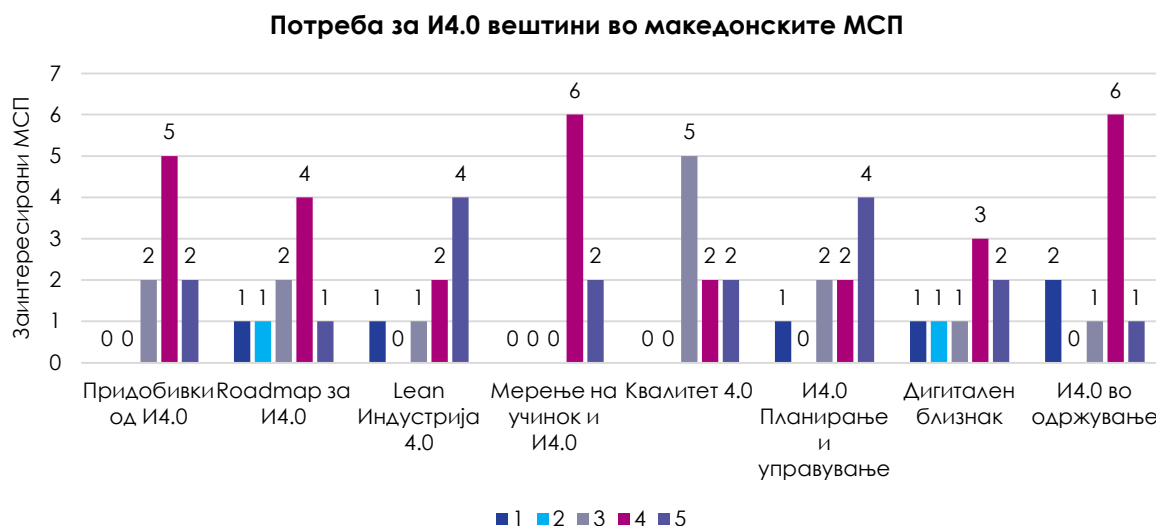
Ниво на имплементација на ДТ во македонските МСП



Слика 4.6 Ниво на стандардизирани и дигитализирани бизнис процеси

Најчест коментар е дека компаниите имплементирале MES, ERP и различни софтверски решенија потребни за производствените процеси, но постои неизвесност

дали овие алатки се целосно искористени, автоматизирани и меѓусебно интегрирани. Дополнително, на прашањето „Кое ниво на И4.0 ви изгледа најсоодветно за обука?“, повеќето компании одговориле со основните нивоа, како што се општите придобивки од Индустрија 4.0, „Патот кон Индустрија 4.0“ и „И4.0 во одржување“, додека одговорите биле многу повоздржани за теми како Lean 4.0, Квалитет 4.0, Планирање и управување на производството 4.0 и дигитални близнаци. Ова укажува дека МСП не се подготвени да преминат кон покомплексни апликации на дигиталните технологии, туку претпочитаат прво да се запознаат со основите на концептите (Слика 4.7).



Слика 4.7 Проценка на потребите за компетенции во македонските компании

Имајќи ги предвид овие одговори, може да се забележи недоследност: компаниите кои тврдат дека веќе користат ERP (кој е на врвот на архитектурата на Индустрија 4.0), сепак покажуваат интерес за почетни курсеви за Индустрија 4.0. Ова претставува уште еден можен проблем и показател за недостаток на стратегија и пристап во имплементацијата на дигиталната трансформација.

Во текот на истражувањето идентификувани се три национални стратегии кои се поврзани со темата дигитална трансформација во Република Северна Македонија. Во овој дел од истражувањето не се прави обид да се критикуваат споменатите стратегии туку да се анализираат од аспект на потврдување на истражувачкиот јаз, пред сè за потребата од јасни насоки за имплементацијата и мерење на дигитална трансформација во производството.

Како најблиска до областа, прва се разгледува **Националната ИКТ стратегија 2023-2027**. Оваа стратегија е изградена врз четири столба: дигитална поврзаност и инфраструктура, дигитални вештини, дигитална влада и дигитализација на бизниси. Таа ја нагласува улогата на ИКТ овозможувачите, дигиталните иновации и напредните технологии (вештачка интелигенција, големи податоци, облак услуги). Целта е забрзана дигитална трансформација, приближување до просекот на ЕУ и развој на дигитална економија. Стратегијата е водич за сите владини активности во оваа област и го поставува темелот за обединета дигитална визија, подобрување на дигиталното знаење кај населението и создавање поволна средина за иновации во бизнис секторот.

Стратегијата за паметна специјализација 2024 - 2027 ја насочува визијата кон зелен и одржлив раст преку знаење, иновации и технологија, со цел создавање производи и услуги со висока додадена вредност конкурентни на домашниот и меѓународниот

пазар. Таа е поставена на четири вертикални приоритетни области (паметно земјоделство и храна, ИКТ, електро-машинска индустрија, Индустрија 4.0, одржливи материјали и паметни згради) и две хоризонтални области (енергија за иднината и туризам), кои заеднички овозможуваат вкрстена иновација. Преку нив се остваруваат стратешките цели за научна извонредност, зајакнување на иновациониот екосистем, зголемена конкурентност и одржливост на бизнисите, развој на човечки капитал и дигитална трансформација на економијата и општеството, поткрепени со постојан дијалог и добро владеење.

Националната развојна стратегија 2024-2044 претставува водечки документ за дефинирање на националните развојни цели и приоритети на Република Северна Македонија, насочени кон забрзан, инклузивен, одржлив и еднаков развој. Таа обезбедува стратешка рамка за усогласено планирање, континуитет и конзистентен одговор на клучните предизвици, независно од политичката ориентација. НРС се темели на три основни цели - зајакнување на конкурентноста и иновациите, подобрување на квалитетот на животот и зајакнување на отпорноста на општеството, како и создавање услови за одржлив и предвидлив развој. Шесте стратешки цели на НРС се: одржлива, иновативна и конкурентна економија; рамномерен и кохезивен регионален развој; инклузивно и правично општество; сигурна и безбедна држава; ефикасно и одговорно управување; и зелена трансформација. Развојот на човечкиот капитал и дигитализацијата се издвоени како централни предуслови за напредок на сите стратешки области.

Табела 4.6 дава кратка анализа на трите анализирани стратегии според неколку важни критериуми поврзани со овој докторски труд, вклучувајќи тоа дали вклучуваат детален патоказ (рамка) за дигитална трансформација, дали нудат алатки за имплементација и мерење на дигиталната трансформација и дали се фокусираат кон производствени компании.

Табела 4.6 *Анализа на стратегии*

Име на стратегијата	Од	До	Патоказ за ДТ	Алатки за ДТ	Мерење за ДТ	Производствен фокус
Национална ИКТ стратегија	2023	2027	Не	Не	Делумно	Не
Стратегија за паметна специјализација	2024	2027	Не	Не	Не	Делумен
Национална развојна стратегија	2024	2044	Не	Не	Не	Не

Сите разгледани стратегии ја потенцираат важноста на дигиталната трансформација за развојот на македонската економија, каде секоја од нив директно ја препознава дигитализацијата како предуслов за конкурентност, иновации и одржливост. Националната ИКТ стратегија 2023-2027 ја нагласува дигиталната инфраструктура, дигиталните вештини и дигитализацијата на бизнисите, при што ИКТ овозможувачите и новите технологии (вештачка интелигенција, големи податоци, облак услуги) се препознаваат како двигатели на дигиталната економија. Стратегијата за паметна специјализација 2024-2027, пак, ја вградува дигиталната трансформација во визијата за зелен и одржлив раст, преку интегрирање на ИКТ, И4.0 и човечки капитал во иновациониот екосистем. Националната развојна стратегија 2024-2044 оди чекор понатаму, поставувајќи ја дигитализацијата како централна основа за сите развојни цели, заедно со човечкиот капитал и зелената трансформација, во функција на долгорочен инклузивен и одржлив развој.

Сепак, доколку стратегиите се споредат за тоа дали обезбедуваат конкретни патокази, алатки и активности за имплементација на дигиталната трансформација, може да се заклучи трите, освен делумно ИКТ стратегијата, не даваат такви насоки.

4.1.2. Дефинирање на целта

Целите на рамката за дигитална трансформација се изведуваат од дефинираните потреби. Поточно, новата рамка за дигитална трансформација треба:

- да ги вклучува Lean принципите и практиките
- сеопфатно да ги адресира предизвиците на компаниите
- да дава јасни насоки и акции за имплементација на ДТ и Lean

Документирањето на концептот, според рамката на [175], покрај потребата, проблемот и целта, содржи и дефинирање на концептуалната тријада:

- Фундаментален концепт (ФК)
- Активност на концептот (АК)
- Објект од интерес (ОИ)

Табела 4.7 ги дава споредба на овие три аспекти со кои треба да се карактеризира рамката, проследено со интерпретација на истите во контекст на овој докторски труд.

Табела 4.7 Концептуална тријада

Концепт	ФК	АК	ОИ
Дефиниција	Централната тема или идеја околу која постои проблемот. Тоа е контекстот или проблемот во кој вашите целни корисници се соочуваат со предизвици.	Главната акција или процес што треба да се случи во рамките на Фундаменталниот концепт за да се реши проблемот. Ова е она што целните корисници треба да го направат во однос на Ф.К	Специфичниот објект, систем или ентитет на кој се применува активноста (А.К.). Тука се случува акцијата.
Поедноставено	Ова е контекстот/главната тема во која се појавува проблемот.	Ова е главната активност што се изведува во рамки на Ф.С. за решавање на проблемот	Ова е објектот/субјектот врз кој се изведува активноста.
Во овој труд...	Дигитална трансформација	Имплементација базирана на Lean менаџмент	Производствени компании

4.2. Структурирање

Фазата на структурирање претставува систематско организирање на идентификуваните проблеми и потреби во логична рамка. Во оваа фаза се воспоставува врска помеѓу барањата и можните решенија извлечени од литературата. Структурирањето е потребно да адресира што е можно повеќе аспекти на проблемот и да ги претстави на визуелно прифатлив начин. Фазата на структурирање се состои од две главни активности, според Табела 4.2 Преглед на активностите во фазите на развој на рамката:

- Дефинирање на барањата (А3),
- Решенија на барањата (А4), и
- Интеграција на решенијата и барањата (А5).

4.2.1. Дефинирање на барањата

Барањата се специфичните услови кои рамката треба да ги задоволи за да ги исполни поставените цели. Барањата се базирани на реалните потреби идентификувани во прегледаната литература. Трите генерални потреби, дефинирани и образложени во

претходното поглавје (4.1. Конципирање), на Слика 4.8 се трансформирани во три клучни барања за рамката за дигитална трансформација.



Слика 4.8 Трансформација на потребите во барања

4.2.1.1. Интегрирање на Lean-размислување и принципи

Во процесот на дигитална трансформација, често постои ризик фокусот да се пренасочи исклучиво кон технологијата, притоа запоставувајќи ги постоечките менаџерски филозофии. Со оглед на тоа што Lean практиките (1) претставуваат темел на современото производство и управувањето со истото, (2) се добро познати и широко распространети во производствената индустрија и (3) се смета дека треба да претходат на имплементацијата на дигиталните технологии, се наметнува потребата тие соодветно да бидат интегрирани во процесот на дигитална трансформација, а со тоа и во рамката за таква имплементација. Дополнителна мотивација за вклучување на Lean концептите како дел од барањата на рамката произлегува и од претходните истражувања покажуваат ограничено третирање на Lean концептите во рамки на дигиталните иницијативи, што создава истражувачки јаз кој може соодветно да се адресира преку предложената рамка за имплементација на дигиталната трансформација. Табела 4.8 ја прикажува трансформацијата на Lean принципите (означени со „P“ од „principles“ за полесно следење низ понатамошниот текст) во контекст на дигиталната трансформација, со цел да се задржи нивното суштинско значење.

Табела 4.8 Принципи на Lean во контекст на дигитална трансформација

P	Lean принцип	Општа дефиниција	Значење во контекст на ДТ
P1	Идентификување на вредност	Вредноста е она што клиентот е подготвен да го плати; сите активности треба да придонесуваат за создавање вредност.	Трансформацијата ги поддржува целите на организацијата и е во согласност со дефинираната стратегија.
P2	Мапирање на тек на вредности	Идентификување на сите активности кои создаваат или не создаваат вредност низ целиот процес; елиминација на загубите.	Моменталната состојба на процесите кои се трансформираат се точно мапирани и ослободени од загуби/рационализирани.
P3	Креирање на тек	Организирање на процесите така што вредноста да се создава непречено, без прекини, чекања или загуби.	Имплементацијата на технологиите е во насока на зголемување на вредноста, културата и интензитетот на претпријатието, со цел да процесите дополнително да се рационализираат.
P4	Дефинирање на влечење	Производството започнува само кога постои реална побарувачка од клиентот, наместо врз база на предвидувања.	Трансформативните иницијативи се согласно потребите на организацијата (стратегии, вработен) и/или од клиентот.
P5	Стремеж кон совршенство	Континуирано подобрување (Kaizen) за елиминација на сите видови загуби и постигнување совршен квалитет.	Континуиран мониторинг на новите процеси и следење на клучни показатели со цел континуирано подобрување.

Барањата кои треба да ги исполни рамката во контекст на следењето на принципите на Lean, а со тоа интегрирање на Lean-размислувањето во имплементацијата на дигиталната трансформација се дадени на Слика 4.9 преку декомпозиција на основното барање Б1.



Слика 4.9 Декомпозиција на барањето за имплементација на Lean-размислувањето преку принципите на Lean во рамката за дигитална трансформација

4.2.1.2. Адресирање на најчестите предизвици за ДТ

При дефинирање на потребата и проблемот за рамката за дигитална трансформација, направена беше детална анализа на најчестите предизвици за имплементацијата на дигиталната трансформација. Ова истражување е претходно презентирани во Поглавје 4.1. Избрани десетте највлијателни предизвици за генерирање на соодветни барања за рамката, односно оние кои се застапени со над 30% во прегледаната литература.

Табела 4.9 го прикажува дефинирањето на предизвиците (означени со „С“ од „challenges“ за полесно следење низ понатамошниот текст), во контекст на ДТ.

Табела 4.9 Барања за решавање на предизвиците за ДТ

С	Предизвици за ДТ	Општа дефиниција	Значење во контекст на ДТ
C1	Недостаток на компетенции и знаење	Недостаток на потребни вештини и знаења	Недостаток на дигитални компетенции и свесност за ДТ
C2	Недостаток на буџет	Недоволни финансиски средства	Недостаток на буџет за ДТ, скапи дигитални технологии
C3	Несоодветен менаџмент на промени	Слабо управување со организациски промени	Свесност и култура за дигитална трансформација
C4	Недостаток на стратегија	Немање јасен план и насока	Недостаток на дигитална стратегија
C5	Недостаток на управување	Недоволно координирање и носење одлуки	Недостаток на улоги и одлуки поврзани со ДТ

С	Предизвици за ДТ	Општа дефиниција	Значење во контекст на ДТ
C6	Запоставување на искуството на клиентите	Слабо задоволство и интеракција со клиентите	Недостаток на фидбек од клиентите во поглед на дигиталните карактеристики на претпријатието
C7	Недостаток на стандардизирани/оптимизирани процеси	Неефикасни и нестандардизирани процеси	Недостаток на рационализација на процесите пред имплементација на технологии
C8	Недостаток на организациска култура	Слаба поддршка за промени и иновации	Недостаток на култура за дигитално размислување
C9	Слаба тимска работа	Недоволна соработка помеѓу вработените	Недостаток на соработка помеѓу тимовите за имплементација на ДТ и постоечките тимови
C10	Недостаток на поддршка од менаџментот/лидерите	Недоволна вклученост на раководството	Недостаток на поддршка, визија и вклученост од лидерите за спроведување на ДТ

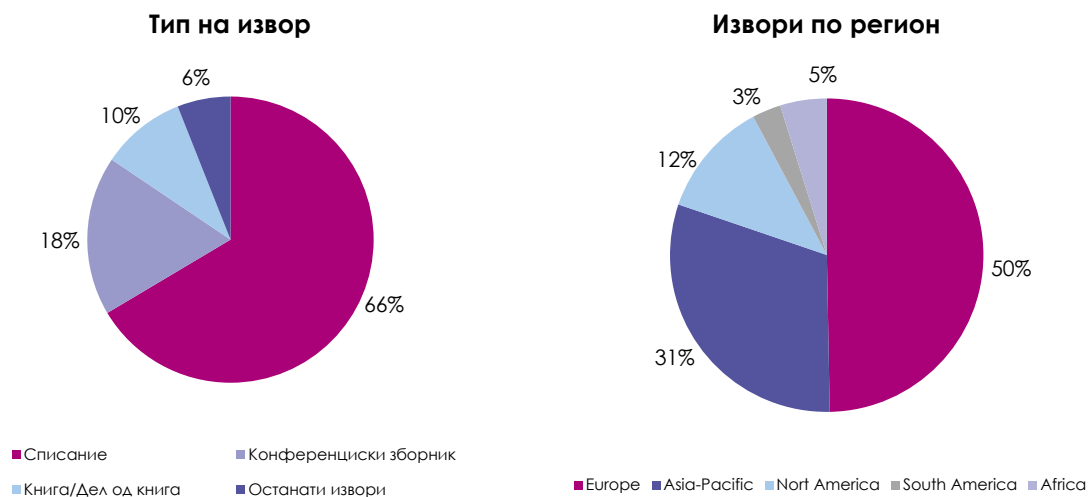
Барањата кои треба да ги исполни рамката во контекст на адресирањето на најчестите предизвици за дигитална трансформација Lean се дадени на Слика 4.10 преку декомпозиција на основното барање R2.



Слика 4.10 Барања кои треба да ги исполни рамката во поглед на предизвиците за ДТ

4.2.1.3. Интегрирање на научени лекции и добри практики за ДТ

Научените лекции се извлечени од преглед на литературата поврзан со активности за дигитална трансформација кои се сретнуваат во литературата. Слика 4.11 дава статистички информации за прегледаната литература во областа на активности за имплементирање на дигитална трансформација. Прегледани се вкупно 167 труда, а деталите се дадени во Прилог 1.



Слика 4.11 Статистички податоци за прегледаната литература

Од анализата издвоени беа голем број на типични активности кои се јавуваат при дигиталната трансформација. Логично е дека во практиката, не секое претпријатие треба да ги имплементира сите алатки, методи и технологии од овој преглед. Собраните алатки ќе послужат за да се дефинира типот на активности кои треба да се преземат за време на имплементација на дигиталната трансформација. За да се добие логичниот редослед, активностите ќе бидат групирани.

Првата категоризација е направена е според столбот на дигитална трансформација на кој се однесуваат:

- активности поврзани со стратегијата,
- активности поврзани со луѓето,
- активности поврзани со процесите,
- активности поврзани со технологијата.

Голем дел од активностите за дигитална трансформација се поврзани и со проектниот менаџмент, но овие активности ги сметаме за задолжителни при водењето на било каков проект т.е. не се специфични за ДТ, па затоа се изоставени од класификацијата.

Категоризацијата на литературата е направена преку систематски преглед на литературата (наслови, апстракти на научни публикации), според клучни зборови за секоја од горенаведените четири категории. Клучните зборови, дадени во Табела 4.10, се избрани од:

- генеричките имиња на столбовите и неколку нивни варијации,
- генеричките дефиниции на четирите столбови презентирани во Поглавје 2 и неколку нивни варијации.

Табела 4.10 Клучни зборови за класификација на литературата

Стратегија	Луѓе	Процеси	Технологија
Strategy	People	Processes	Technology
Strategic	Human	Process	Big data and Analytics
Maturity	Training	Lean	Internet of Things
Change	Upskilling	Standardization	Autonomous robots
Innovation	Reskilling	Optimization	The Cloud
ROI	Competencies	Workflow	Additive manufacturing
Vision	Capabilities	Streamline	Augmented reality
Goals	Culture	Waste	System Integration
		Continuous improvement	Cyber security
			Simulation
			Artificial intelligence

Систематскиот преглед е направен на насловите и апстрактите на избраната литература. Датотеката со наслови и апстракти е физички преголема за да биде поставена во дисертацијата, а класификацијата на трудовите е дадена во Прилог 1. Во случаите каде што еден труд е класифициран во повеќе од еден столб, направена е проверка и класификација на трудот соодветно од страна на авторот.

Табелата во Прилог 1 ги дава резултатите од анализата. Колона „Класификација“ ги дава резултатите од класификацијата со систематски преглед на литературата. Активностите потоа се групирани по сличност во соодветниот столб, и дадени им се генерични имиња базирани на заедничките карактеристики на овие активности (колони „Активности“). Табела 4.11 дава извадок само од групирањето на активностите согласно нивната сличност. Групата на активности е дадена изворно, на англиски јазик.

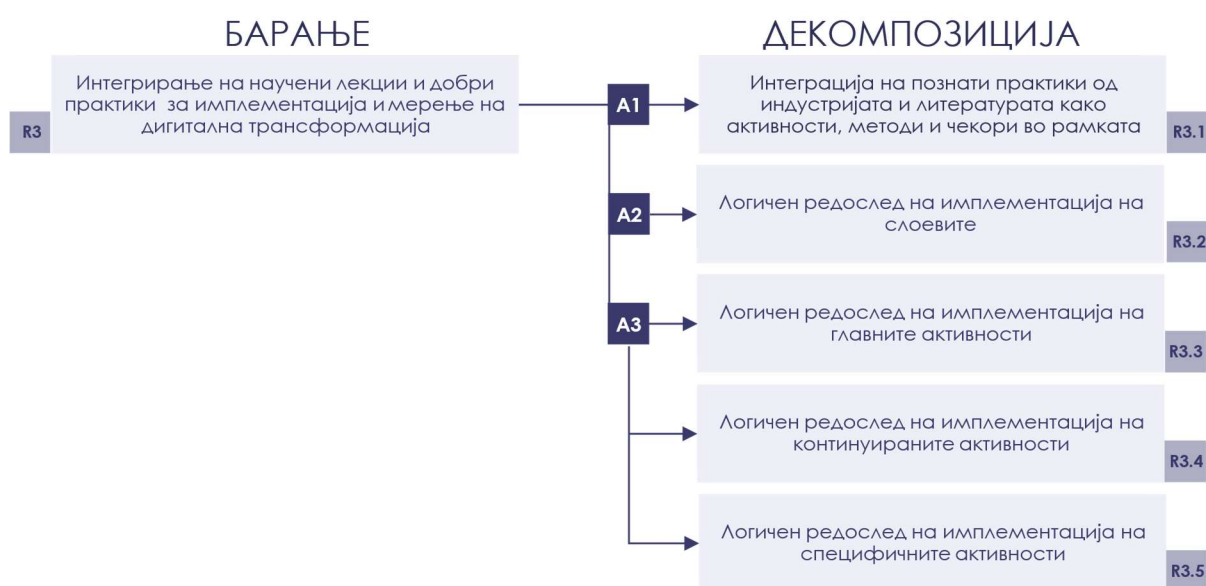
Табела 4.11 Групирање на активности по слоевите на ДТ

Слој	Група на активности	Извори
Стратегија	Setting (digital) strategy	22
	Change management	3
	Strategic planning	7
	Sustainability & ecosystem interaction	6
	Stay on track with strategy (post implementation activities)	5
Луѓе	Upskill/reskill for basic digital competences	21
	Human resources	9
	Teamwork	3
	Communication	3
	Involve employees	3
	Continuous improvement	2
Процеси	Streamline processes	36
	Architect process changes	1
	Continuous improvement	8
Технологија	Assess existing technology	6
	Deploy needed technology	22
	Integrate technology into the existing layout	8
	Monitor and continuous improvement	2

Во овој момент може да се воведат и термините: главни, континуирани и специфични активности. Имено, во секој од слоевите може да се забележи дека има активности кои отскокнуваат по бројот на извори во кои истите се споменуваат, ова е наод дека овие активности се веројатно важни во соодветниот слој. Постојат и активности со висока застапеност во литературата, кај кои од теоријата на проектниот менаџмент е јасно дека се активности кои се провлекуваат низ целиот проект. Според оваа анализа, активностите се групираат на три групи:

- **главни активности** - ова е генеричката активност која е претходник на сите останати акции во слојот, оваа активност најчесто обединува и најмногу извори од претходниот преглед на литература. Во проектниот менаџмент овој тип на активности се многу чести - посебно во методологиите кои имаат го следат „waterfall“ циклусот. Според литературата од областа, Главната активност на фазата на проектот е суштинска задача или збир на задачи специфична за фазата што мора да се заврши за да се започне фазата и да се постигне нејзиниот примарен резултат. Таа претставува централен фокус на таа фаза во животниот циклус на проектот и е предуслов за преминување во следните фази[190], [191].
- **континуирани активности** - во проектен менаџмент (низ фазите на проектот) се однесува на задача, процес или одговорност што не е ограничена на една фаза од животниот циклус на проектот, туку се протега и се повторува низ повеќе или сите фази од проектот. Овие активности во управувањето со проекти се активности што се протегаат надвор од една фаза на проектот и придонесуваат за целокупниот успех на проектот. Овие активности обезбедуваат знаењето, научените лекции и ресурсите ефикасно да се споделуваат и користат низ различни фази од животниот циклус на проектот [191].
- **специфични активности** - се активности што се врзани исклучиво за одредена фаза од проектниот животен циклус. Тие се спроведуваат за да се постигнат целите и очекуваните резултати на таа конкретна фаза, и обично завршуваат пред проектот да премине во следната фаза. Овде рамките во суштина ја добиваат и својата карактеристика на флексибилност т.е. поради фактот што нема конечна листа на ваков тип на активности, проектните менаџери вообичаено избираат приоритетни алатки/активности соодветни на контекстот (типот на проектот, претпријатието, тимот) кои ќе придонесат до остварување на целите на фазата. Ваков е најчесто случајот и во Lean Six Sigma проектите каде во секоја фаза се нудат голем број на алатки и активности според методологијата, но проектните тимови избираат само дел за користење [192].

Барањата кои треба да ги исполни рамката во контекст на следењето на најчестите активности за дигитална трансформација во литературата, се дадени на Слика 4.12.



Слика 4.12 Декомпозиција на барањата

4.2.2. Решенија на барањата

По собирањето на почетните информации од засегнатите страни, фазата на анализа (или рафинирање) на барањата осигурува дека барањата се генерализирани (со цел поедноставување) и разјаснети. Не ретка практика во системското инженерство е и приоритизација на ваквите барања [183].

Откако ќе се добијат елементите на проблемот што треба да се реши, ќе се започне со одредување на структурните елементи на рамката што се дизајнира. Овие структурни елементи се решение за секое барање што го сочинува списокот добиен во претходната активност. Потребно е да се изврши пребарување на решенија достапни во литературата за секое барање и да се изберат оние што најдобро одговараат на нашиот специфичен контекст. Постојат различни критериуми за спроведување на овој избор, вклучувајќи леснотија на користење, ефикасност и популарност, меѓу другото. Секој тим истражувачи мора да ги дефинира своите критериуми според своите интереси.

Во овој труд, решенијата се избрани од множеството на случаи прегледани во литературата изложена претходно и дополнителна литература поврзана со активности и менаџмент на проекти во областа на дигитална трансформација. Во други случаи или при развој на рамки од страна на поголеми тимови, овој чекор може да биде едноставно имплементиран во вид на брејнсторминг или панел дискусија.

Табела 4.12 ги сумира барањата од претходните три поглавја и нивните решенија. Со црвено се означени барањата кои се дуплираат т.е. се јавуваат и во другите групи на барања или можат да бидат споени со некое друго барање од другите групи.

Табела 4.12 Сумирани барања за рамката на ДТ

Р.б.	Група	Барање	Рафинирано барање	Решение
Б1	Принципи	Lean принципите можат да се препознаат во рамката за дигитална трансформација.	Интеграција на Lean принципите во рамката за дигитална трансформација	P13 - Да се препознаат Lean принципите во рамката за ДТ
-	Принципи	Рамката предвидува дигитални иницијативи кои се во согласност со стратегијата на претпријатието.	Усогласеност на дигиталните иницијативи со стратегијата	-
Б2	Принципи	Рамката нуди алатки за мапирање и мерење на постоечките столбови на дигиталната трансформација.	Алатки за мапирање и мерење на состојбата на дигиталната трансформација	P14- Специфични активности за мапирање и мерење на луѓе, процеси и технологија
Б3	Принципи	Рамката овозможува имплементација кои јасно ги подобруваат постоечките показатели во столбовите на дигиталната трансформација.	Подобрување на показателите преку имплементирани иницијативи	P15 - Специфични активности за имплементација и интеграција на иницијативи за луѓе, процеси и технологија во насока на подобрување на показателите
-	Принципи	Иницијативите за дигитална трансформација доаѓаат од реалните потреби на претпријатието (вработени и/или клиенти).	Иницијативи засновани на реални потреби од вработени и/или клиенти	-
-	Принципи	Новите решенија соодветно се интегрирани и искомунуцира во постоечките процеси уште од самиот почеток на иницијативата.	Рана интеграција и комуникација на новите решенија во постоечките процеси	-
Б4	Принципи	Рамката нуди начин за мониторинг на показателите пост-имплементацијата и иницијативи за нивно континуирано подобрување.	Мониторинг и континуирано подобрување на показателите по имплементација	P16 - Специфична активност - мониторинг и континуирано подобрување на показателите за луѓе, процеси и технологија
Б5	Предизвици	Базични дигитални вештини пред имплементација на новите технологии	Развивање на основни дигитални компетенции	P1 - Задолжителна активност - upskilling/reskilling за ДТ
Б6	Предизвици	Ориентација на новите дигитални улоги во компанијата	Ориентација на новите дигитални улоги во компанијата	P2- Специфична активност - ориентација на дигиталните улоги
Б7	Предизвици	Рамката да овозможува имплементација на проекти со различен обем/различни нивоа од ПС	Флексибилност на рамката за примена во проекти со различен обем и нивоа од ПС	P3 - Тродимензионален модел - трета димензија ниво на имплементација
Б8	Предизвици	Брз видлив поврат на инвестицијата	Обезбедување на брз поврат на инвестицијата	P4 - Можност за имплементација на повеќе иницијативи од еднаш.
Б9	Предизвици	Менаџмент на промени	Систематски менаџмент на промените	P5 - Континуирана активност - менаџмент на промени во текот на целата трансформација
Б10	Предизвици	Усогласеност на иницијативите со стратегијата	Идентификува стратегија според која треба да се води трансформацијата	P6 - Задолжителна активност - воспоставена (дигитална) стратегија
-	Предизвици	Осигурување дека постои управувачка рамка и матрица на одговорности пред воведувањето на нови технологии/процеси	Усогласеност на дигиталните иницијативи со реалните потреби	-
Б11	Предизвици	Дигиталните иницијативи (подобрува) да бидат по pull системот	Методолошки дефиниран пристап во имплементацијата на ДТ	P7 - Самата рамка го решава овој предизвик.
Б12	Предизвици	Интеграција на Lean принципите - задолжително мапирање и мерење на постоечката состојба и мониторинг и континуирано подобрување на идната состојба.	Оптимизација/рационализација на процесите пред имплементација на дигиталните иницијативи	P8 - Задолжителна активност - рационализација на процесите пред ДТ - согласно истражувањето Lean пред ДТ
-	Предизвици	Осигурување на континуирано подобрување преку континуиран мониторинг на имплементирани иницијативи.	Континуирано подобрување и мониторинг на сите имплементирани иницијативи	-
Б13	Активности	Логичен редослед на имплементација на слоевите	Логичен редослед на имплементација на слоевите на рамката	P9 - Стратегија - Луѓе - Процеси - Технологија
Б14	Активности	Логичен редослед на имплементација на главните активности	Логичен редослед на имплементација на главните активности	P10 - Преглед на главните активности од секој слој - според прегледот на литературата
Б15	Активности	Логичен редослед на имплементација на континуираните активности	Логичен редослед на имплементација на континуираните активности	P11 - Преглед на континуираните активности од секој слој - според прегледот на литературата
Б16	Активности	Логичен редослед на имплементација на специфичните активности	Логичен редослед на имплементација на специфичните активности	P12 - Преглед на специфичните активности и нивен распоред

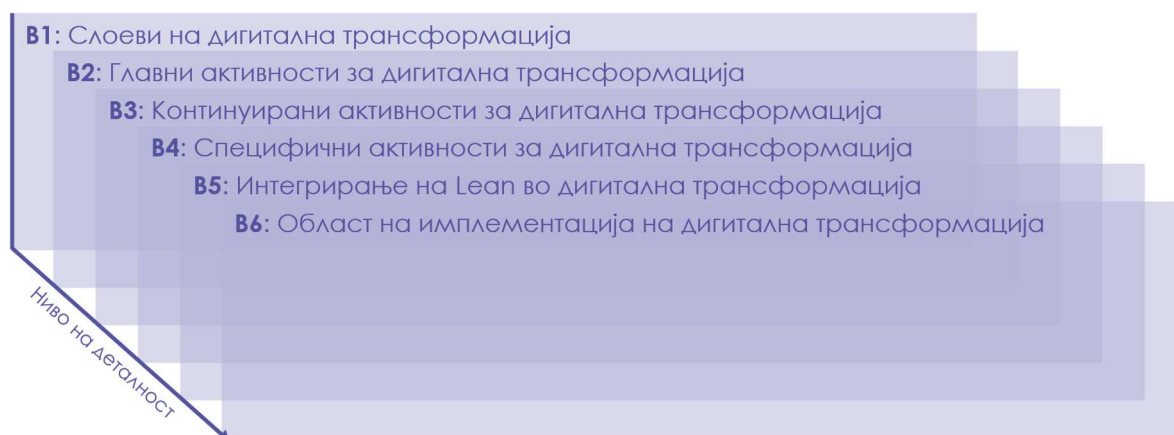
4.2.3. Интеграција на решенијата и барањата

Во овој чекор фазата на конципирање на рамката, поставените барања за рамката треба да се интегрираат со генерираните решенија. Оваа фаза уште се вика и „make it all make sense“, односно сите претходни истражувања, прегледи и концепти треба да бидат интегрирани во едно визуелно решение кое ќе ја задоволи целта на рамката дефинирана на почетокот.

Објаснувањето на предложената рамка ќе се реализира во повеќе фази, со постепено имплементирање на решенијата на барањата од **Табела 4.12** ги сумира барањата од претходните три поглавја и нивните решенија. Со црвено се означени барањата кои се дуплираат т.е. се јавуваат и во другите групи на барања или можат да бидат споени со некое друго барање од другите групи.

Табела 4.12, а со тоа и постепено зголемување на деталноста на рамката. Важно е да се нагласи дека сите последователни визуелизации ќе претставуваат постепена еволуција и деталзирање на рамката, со цел да се задржи логичката и концептуалната конзистентност на различните нивоа на деталност во поширокиот контекст на дигиталната трансформација на претпријатието. Секоја наредна визуелизација ќе се надоврзува на претходната, овозможувајќи систематско, постепено и јасно претставување на рамката.

Идејата е секоја визуелизација да може да функционира и како самостоен концепт. Начинот на презентирање на интеграцијата на решенијата со барањата визуелно е прикажан на Слика 4.13, а во продолжение истото ќе започне од најниското ниво на деталност (B1).



Слика 4.13 Нивоа на деталност на рамката

Во зависност од намената и контекстот на примена, претпријатијата можат да изберат соодветно ниво на рамката кое ќе го следат при имплементацијата. Ова претставува една од клучните карактеристики на ваквиот тип рамки, односно нивната флексибилност и можност за адаптација кон специфичните потреби на корисникот. За начинот на користење на рамката во зависност од потребата, повеќе ќе се дискутира во поглавјето 4.4. Документирање.

Редоследот на имплементирање на решенијата е одлучен според нивната задолжителност и флексибилност во визуелизацијата. Па така, се започнува со решенијата од 10 до 14 (согласно Табела 4.15) поради тоа што во оваа група на решенија спаѓаат логичните распореди на активностите за кои постои мала можност за флексибилност при визуелизацијата. Потоа следува имплементацијата на

задолжителните активности, а потоа и на специфичните активности (доколку истите претходно не биле имплементирани попатно со претходните решенија). На крајот доаѓа имплементацијата на концептите кои треба само да се препознаваат со рамката односно Lean принципите и нивото на имплементација во организацијата.

Слоеве на дигитална трансформација

Решението 11 (S11) се однесува на дефинирање на логичен распоред на четирите слоеви на дигиталната трансформација претходно дефинирани во третото поглавје од овој труд, стратегија, луѓе, процеси и технологии. Методолошки гледано, потребно е да има повеќе решенија за секое од барањата, а во овој случај, различните решенија би биле различни распореди на слоевите. Но во поглед на тоа кој слој треба да биде почетен, во литературата речиси и да нема дилеми [17], [193], [194], дека тоа треба да биде слојот „стратегиија“ кој ги дефинира насоките, приоритетите и ограничувањата на процесот на дигитална трансформација (покрај другите иницијативи во претпријатието доколку се работи за сеопфатна стратегија, а не за посебна, дигитална стратегија).

„Луѓе“ се следниот слој кој треба да се третира, односно согласно стратегиите, луѓето мора да стекнат знаења, вештини и јасни улоги, кои ќе придонесат кон оптимизирано спроведување на процесите во слојот „Процеси“. Следниот слој кој треба да се третира е слојот „Процеси“ за кој потребно е да добиеме целосна слика за моменталната состојба и визија за тоа како би изгледала идеалната. Процесите во најмала рака треба да бидат ослободени од очигледните растурања, а чекорите да бидат јасно мапирани со соодветни влезови, излези и извршители. Откако ќе се направи рационализацијата, постои подлога за имплементација и на слојот „Технологии“, кој поради својата комплексност, може да биде значително сложен за имплементација. Овој редослед на слоевите го поддржуваат повеќе научни трудови [135], [195], [196]. Визуелизацијата на рамката согласно оваа дискусија е дадена на Слика 4.14. Оваа визуелизација нема посебно значење од аспект на имплементацијата, но има големо информативно значење при разбирање на процесот на дигитална трансформација и поврзаноста на нејзините слоеви, но и за сериозниот мултидисциплинарен пристап при трансформацијата.



Слика 4.14 Визуелизација на редоследот на имплементација на слоевите за ДТ

Главни и континуирани активности

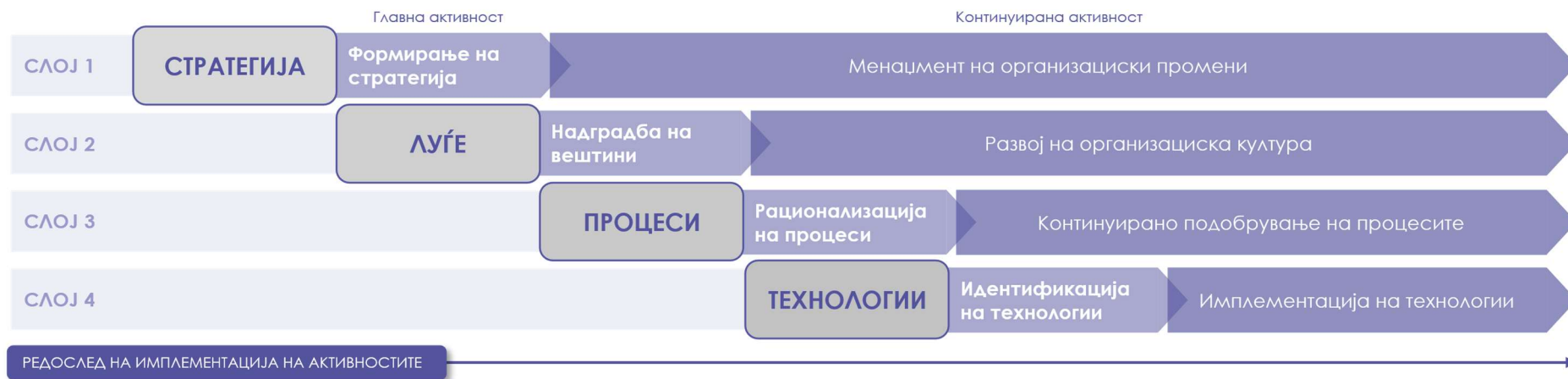
При анализата на групите на активности и бројот на извори кои се поврзуваат со истите во Поглавје 4.2.1.3, може да се забележи дека во секој од столбовите на ДТ има по барем една група на активности која се поврзува со најголем дел од изворите класифицирани во соодветниот слој. При подетална анализа, може да се заклучи дека ваквите активности се најчесто клучни активности кои служат како еден вид на услов и претходник, односно активности кои мораат бидат имплементирани пред да се започне со специфичните активности за дигитална трансформација. Овие активности понатаму ќе бидат нарекувани **главни активности**. Останатите активности може да бидат разделени на **континуирани** (активности кои треба да се изведуваат во текот на целата дигитална трансформација) и **специфични** (активности карактеристични за одреден момент од животниот циклус на ваквиот проект).

Табела 4.13 дава класификација и објаснување на главните групи од активности според прегледот на литературата и нивна категоризација на главни и континуирани.

Табела 4.13 Идентификација на главните и континуираните активности

Слој	Група на активности	Категорија	Конечно именување
Стратегија	Setting (digital) strategy Strategic planning Sustainability & ecosystem interaction Post-implementation strategic activities	Главна	Формирање на (дигитална) стратегија
	Change management	Континуирана	Менаџмент на организациски промени
Луѓе	Upskill/reskill for basic digital competences Human resources Teamwork	Главна	Надградба на вештини
	Communication Involve employees Continuous improvement	Континуирана	Градење на организациска култура
Процеси	Streamline processes Architect process changes Continuous improvement	Главна Континуирана	Рационализација на процеси Континуирано подобрување на процесите
	Assess existing technology Deploy needed technology Integrate technology into the existing layout Monitor and continuous improvement	Главна Континуирана	Идентификација на потребни технологии Имплементација на дигитални технологии

За сега, сите три типови на активности немаат редослед, но согласно барањата за рамката, редослед потребно е да се направи. Со следната визуелизација на Слика 4.15 се имплементираат Решение 12 (S12) и Решение 13 (S13) од Табела 4.12. Паралелно, поради нивната поврзаност, се имплементираат и Решенијата 2, 5 и 8. Сликата ја дава втората визуелизација на рамката која е делумно оперативна доколку истата се користи за стратешко планирање т.е. планирање само на крупните активности кои еден процес на сеопфатна дигитална трансформација би требало да ги содржи на ниво на целото претпријатие. На оваа визуелизација претставени се слоевите заедно со главните и континуираните активности кои кореспондираат со соодветните слоеви.



Слика 4.15 Распоред на главните и континуираните активности

Специфични активности

Специфичните активности се активностите кои треба да бидат распоредени низ животниот циклус на проектот за имплементација на дигиталната трансформација, но за истите повторно е потребно е да се направи одредена класификација и генерализација бидејќи согласно прегледот на литературата постојат голем број на вакви активности. Во прегледаната литература, се забележува е дека овие активности вообичаено се проектно ориентирани т.е. тие претставуваат конкретни задачи/алатки/методи кои се изведуваат за да се обезбеди напредокот на проектот и постигнувањето на предвидените резултати. Поради ова, како референца земена е класификацијата на активностите според познатите методологии за проектен менаџмент и подобрување на процесите. Во Табела 4.14 дадена е споредба на четири вакви методологии со цел да се прикаже потенцијална шема при претставувањето на ваквите активности кај познатите методологии. Имињата на фазите се дадени изворно на англиски јазик со цел да не се изгуби контекстот при преводот.

Табела 4.14 Типови на активности за имплементација низ проектни методологии

PMI [191]	SCRUM [197]	ISO 21500 [198]	DMAIC [199]
Initiating	Initiate	Initiating	Define
Planning	Plan & estimate	Planning	Measure + Analyze
Executing	Implement	Implementing	Improve
Monitoring & controlling	Review & retrospect	Controlling	Control
Closing	Release	Closing	Control

Анализата на фазите покажува дека помеѓу PMI, SCRUM, ISO 21500 и Lean Six Sigma (DMAIC) постои значително поклопување, иако пристапите се разликуваат. Сите методологии ја признаваат потребата од иницијална фаза за дефинирање на целите, проследена со планирање, извршување, контрола и завршување. PMI и ISO имаат повеќе линеарен и структуриран пристап, SCRUM е итеративен и ориентиран кон брза испорака, додека Lean Six Sigma е аналитички насочен со силен акцент на мерење, анализа и подобрување. Најголемите разлики се забележуваат во финалната фаза: PMI и ISO ја дефинираат како формално затворање, SCRUM како испорака, а Lean Six Sigma како контрола на процесот.

Доколку PMI методологијата ја земеме како референтна и истата ја споредиме на сличен начин со методологиите за дигитална трансформација дадени во Табела 4.15, се добива уште една шанса за подобрување на досегашниот пристап и начин на разликување на новата методологија од веќе постоечките. Табела 4.15 дава споредба на постоечките методологии за дигитална трансформација и PMI.

Табела 4.15 Споредба на постоечките методологии со PMI

Рамка	Иницирање	Планирање	Екзекуција	Мониторинг и контрола	Затворање
[29]	Менаџмент на ризици, анализа на компетенции, анализа на трошоци и придобивки	Идентификација на процес, откривање на проблем и анализа	Дизајн на процес, ре-инженеринг и валидација	Менаџмент на промени, мониторинг на процес	—
[24]	Стратешко планирање, менаџмент стратегија, организациска структура, управувачи комитет	Приоритизација на проекти, одлука за инвестиции	—	—	—
[30]	—	План, анализа	Дизајн, развој, имплементација, тестирање, пуштање во употреба	Одржување	—

Рамка	Иницирање	Планирање	Егзекуција	Мониторинг и контрола	Затворање
[200]	Менаџмент и управување	Анализа	Дизајн, развој, егзекуција	Менаџмент на промени, оптимизација, подобрување	—
[27]	Определување на тим, цели и стратегии	Проценка на зрелост, дефинирање на можности, капацитети, приоритизација на проекти, обем	Имплементација	Менаџмент на промени	Одлука за реплицирање и проширување
[26]	Бенчмаркинг со конкуренцијата	Моментална и идна состојба, Јаз анализа, Бизнес кејс, патоказ	Имплементација на патоказ	—	—

Преку овие анализи може да собереме доволно наоди дека специфичните активности за имплементација, и при традиционален проектен менаџмент, но и при постоечките рамки за дигитална трансформација, можат примарно да се поделат во неколку групи и тоа:

- активности за дефинирање/иницирање,
- активности за планирање,
- активности за имплементирање,
- активности за мониторинг,

Сепак, бидејќи оваа класификација е заснована на рамки за проектен менаџмент, каде проектите имаат јасно дефиниран почеток и крај, одредени активности поврзани со дигиталната трансформација не можат експлицитно да се вклопат во претходно дефинираните типови. Ова особено се однесува на активности кои се појавуваат во литературата, но и произлегуваат од идентификуваните барања и мотиви за развој на рамка за дигитална трансформација. Такви активности се:

- активности за интегрирање со постоечките практики,
- активности за континуирано подобрување.

Ова е логично поради тоа што проектите кои се поврзани со производство или пак проекти поврзани со научни и/или државни аспекти вообичаено имаат почеток и крај и континуираното подобрување вообичаено се гледа како нов проект. Интеграцијата со постоечките процеси вообичаено е дел од активностите за имплементација.

Овие активности потребно е да го најдат своето место низ слоевите на дигиталната трансформација во соодветен редослед. Слика 4.16 ја илустрира позицијата на специфичните активности во рамката.

На сликата во редовите најпрво дадени се четирите слоеви на дигиталната трансформација, заедно со нивните главни активности кои се подредени по редоследот на имплементација, односно започнувајќи од активностите за слојот „Стратегија“ и завршувајќи со главната активност за слојот „Технологи““. Според замислената временска оска, континуираните активности траат во текот на целата трансформација, а после нивно воспоставување, паралелно на нив се одвиваат и групите специфичните активности за дигитална трансформација, во логичен редослед, започнувајќи од активностите за дефинирање/иницирање и завршувајќи со активностите за мониторинг и континуирано подобрување.



Слика 4.16 Интеграција на специфичните активности во рамката

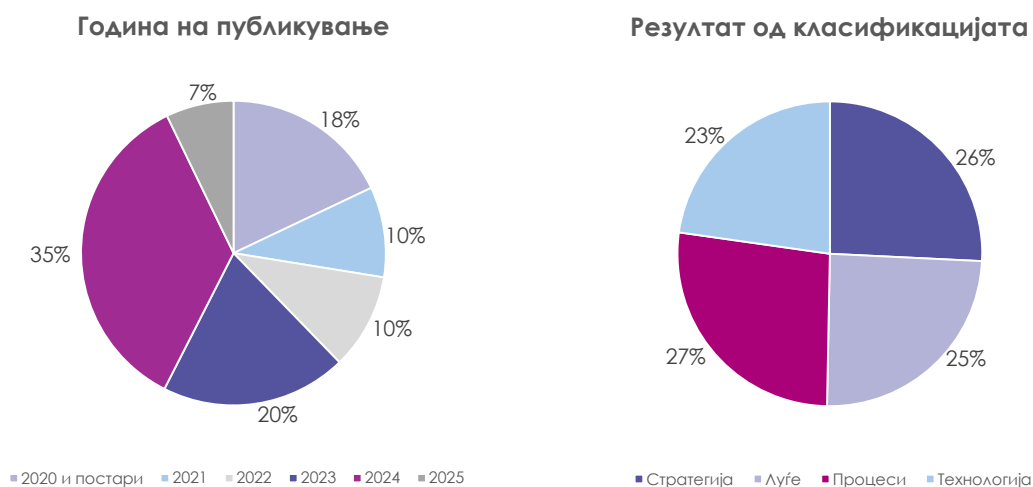
Со цел препознатливост и поедноставување на терминологијата во рамката, овие активности се именувани согласно нивниот опис:

- активности за дефинирање/иницирање - „Sketch“,
- активности за планирање - „Clarify“,
- активности за имплементирање - „Apply“,
- активности за интегрирање со постоечките практики - „Link“,
- активности за мониторинг и континуирано подобрување - „Enhance“.

Имињата на фазите, на англиски јазик го создаваат акронимот **SCALE**, кој симболично ја претставува суштината на дигиталната трансформација, односно проширување на дигитализираните процеси низ целата компанија.

Од овој момент понатаму, активностите, алатките и методите кои се дефинираат во секој од слоевите односно фазите на имплементација можат да бидат флексибилни согласно веќе воспоставените практики во претпријатијата.

Како што и во почетните поглавја беше наведено, дигиталната трансформација, исто како и Lean, веројатно никогаш нема да имаат единствена и конечна листа на активности, алатки и методи кои се користат при имплементацијата. Со цел да се дадат груби насоки и примери кои активности, алатки и методи се среќаваат во литературата, применет е скрининг на над 200 наслови и апстракти на трудови од областа и истите со помош на систематски преглед на литературата се класифицирани на четири групи согласно клучните зборови кои ги содржат.



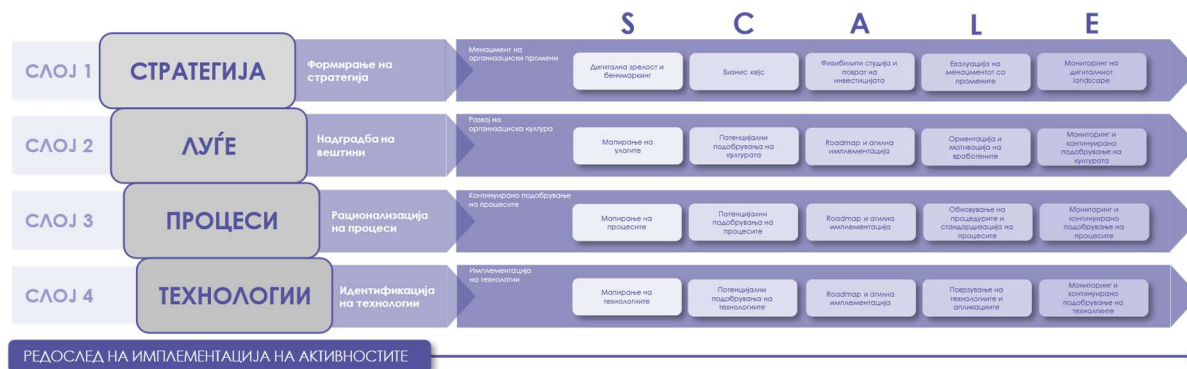
Слика 4.17 Статистички податоци за прегледот на литературата за активности за имплементирање на дигитална трансформација

Ваквата класификација може многу лесно да се направи кај активностите за дигитална трансформација, со идентична анализа како кај слоевите. Резултатите од истата се дадени во Прилог 1. Поради тоа што овие активности не се задолжителни за ниту еден од слоевите, во продолжение во Табела 4.16 ќе бидат дадени само наоди за застапеност на истите во литературата. Во табелата дадена е и конечната листа на специфични типови на активности, со тоа што додадени се двете дополнителни активности, во редослед логичен за процесот на имплементација на дигиталната трансформација.

Табела 4.16 Дел од специфичните активности во секоја од групите

Група на активности	Извори
Активности за дефинирање/иницирање	[201], [202], [203], [204], [205]
Активности за планирање	[206], [207], [208]
Активности за имплементирање	[209], [210], [211], [212]
Активности за интегрирање со постоечките практики	[213], [214], [215]
Активности за мониторинг и континуирано подобрување	[216], [217], [218], [219], [220]

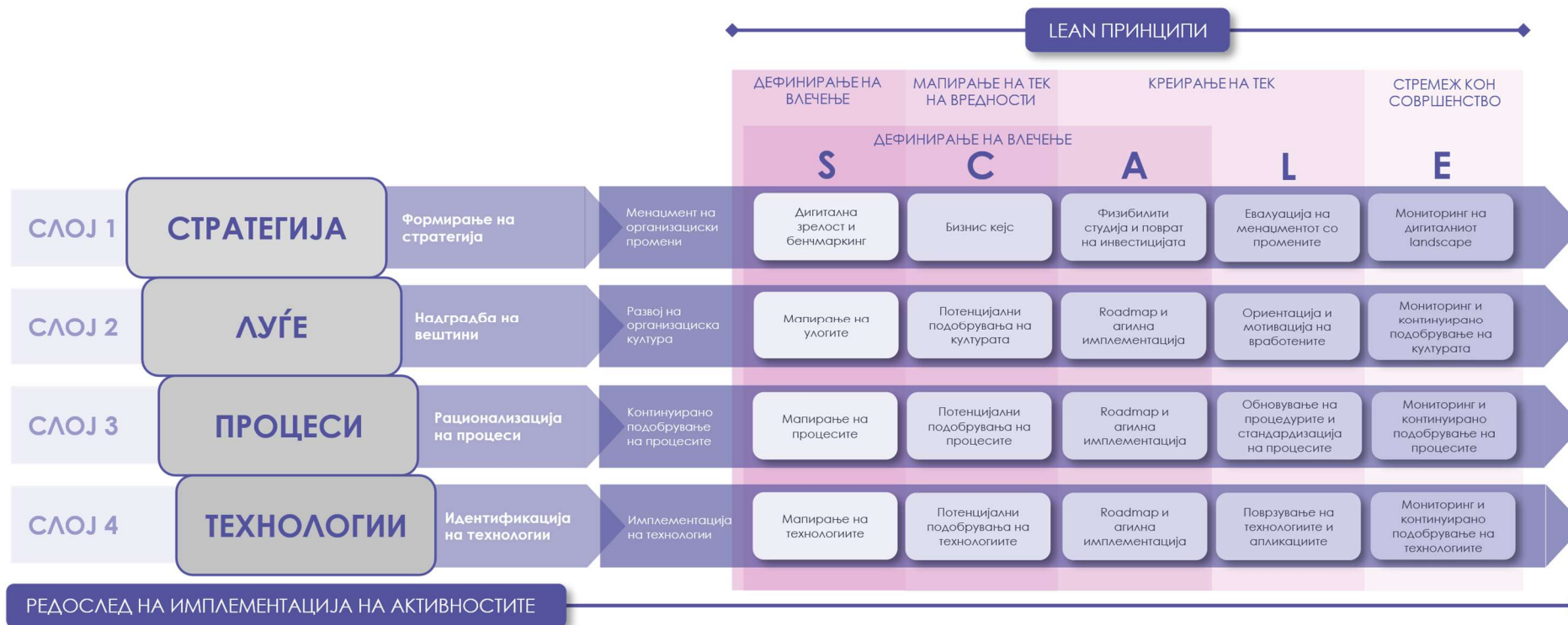
Следната визуелизација (Слика 4.18) ги деталзира специфичните активности избирајќи специфични активности на основа на прегледаната литература. Ова подоцна помага и при дефинирање на секоја од фазите на SCALE циклусот и може да се искористи како водич при избирање на други, посспецифични активности, кои одговараат на соодветните услови. Листата на активности дадена во Прилог 1 и листата на избрани активности дадена на Слика 4.18 не се конечни ниту единствени, туку предлог од страна на авторот.



Слика 4.18 Визуелизација на деталните специфични активности

Lean принципи

Слика 4.19 ја прикажува препознатливоста на Lean принципите во рамките на концептуалната рамка и нивото на имплементација во компанијата. Оваа слика го визуелизира **Решение 4**. Lean принципите не се симетрично распределени во фазите на SCALE. Принципот „Дефинирање на вредност“ се поврзува со првата фаза, бидејќи таа фаза служи за дефинирање што е важно, односно што претставува вредност во процесот на имплементација. Принципот „Мапирање на тек на вредности“ соодветствува на втората фаза „Plan“, која започнува со мапирање на тековната состојба на сите слоеви. Третиот принцип, „Креирање на тек“, е идентификуван во фазите „Apply“ и „Link“, бидејќи овие фази обезбедуваат технички решенија за надминување на идентификуваните предизвици и за обезбедување континуиран тек на процесите. Принципот „Дефинирање на влечење“ се преклопува со три фази на SCALE, бидејќи тие се усогласени со стратегијата која ги дефинира потребите на компанијата за дигитална трансформација. Последниот принцип, „Стремеж кон совршенство“, е изразен во финалната фаза „Monitor“, каде што се интегрирани активности за мерење на идната состојба и идентификација на потенцијални подобрувања врз основа на добиените резултати.

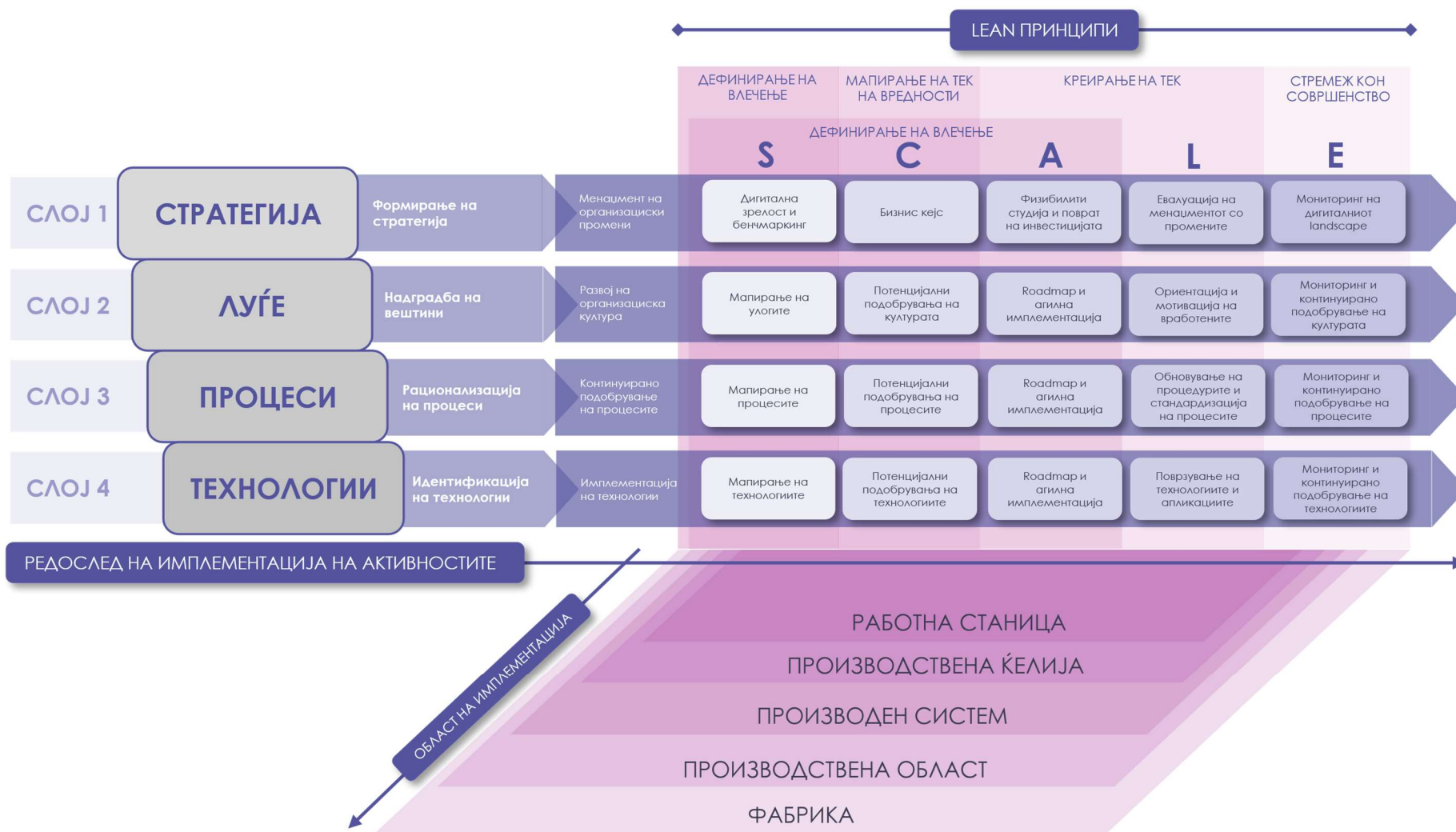


Слика 4.19 Имплементација на Lean принципите

Ниво на имплементација

Нивоата на имплементација ги претставуваат областите во кои оваа рамка може да се примени, дадени на визуелизацијата на рамката на Слика 4.20. Со тоа се одговара на предизвиците со кои се соочуваат одредени компании, особено поради недостаток на време и финансиски средства. Мали подобрувања на едно работно место или во рамки на една производна ќелија сè уште можат да бидат усогласени со стратегијата и да придонесат кон пошироката дигитална трансформација (DT) на компанијата. Овие нивоа се дефинирани согласно [221]:

- работна станица - место каде што извршителот изведува една или повеќе операции со користење на опрема и алати,
- производствена ќелија - група на работни станици организирани за заедничко извршување на поврзани операции,
- производен систем - целокупен систем од луѓе, машини, материјали и процеси за производство на производи,
- производствена област - поголем дел од фабриката што опфаќа повеќе производни системи или процеси,
- фабрика - цел објект во кој се организира и реализира производството на производи или услуги.



Слика 4.20 Област на имплементација

Детали за мерењето на дигиталната трансформација

Во овој дел фокусот ќе биде ставен на фазите и активностите каде се врши мерење на успешноста на дигиталната трансформација, ова вклучува:

- Избор на показатели за „мерење“ на луѓе, процеси и технологии
- Активности за мониторинг и анализа на луѓе, процеси и технологии

На овој дел од рамката за дигитална трансформација е ставен посебен акцент поради поврзаноста со студиите на случаи поврзани со влијанието на дигиталните решенија врз клучните показатели во претпријатијата. Имињата на показателите во секој од слоевите се избрани со цел полесна навигација низ теоретскиот, и многу повеќе подоцна низ практичниот дел од овој труд. Успешноста за дигитална трансформација се предлага да се мери преку три димензии и тоа:

- дигитална култура (ДК),
- дигитална вредност (ДВ), и
- дигитален интензитет (ДИ).

Трите димензии се инспирирани од основните слоеви на дигиталната трансформација луѓе, процеси и технологија (Слика 4.21). Дигитална култура и дигитален интензитет како термини претходно се среќаваат во моделот на зрелост на BDC, а тука дефинициите се прошируваат кон посеопфатни термини кои се однесуваат на показателите за мерење на дигиталната култура на луѓето и дигиталниот интензитет на технологијата. За разлика од димензијата дигитална вредност која е оригинална за овој труд. Таа се однесува на мерење на процесите, а доаѓа од терминот „додадена вредност“ односно мери колку вредност додава дигиталната трансформација на процесите.



Слика 4.21 Визуелизација на димензиите на показатели за дигитална трансформација

Дигитална култура - Дигиталната култура се однесува на степенот на прифаќање, адаптација и интеграција на дигиталните решенија во секојдневното работење на организацијата. Таа вклучува **знаења, ставови, верувања и практики** кои овозможуваат ефикасно користење на дигиталните технологии со цел зголемување на продуктивноста и иновативноста. Дигиталната култура не се сведува само на употребата на дигитални алатки, туку и на подготвеноста на луѓето да се прилагодуваат на нови технолошки трендови, да учат нови вештини и да користат податоци за донесување на одлуки. Мерењето на дигиталната култура е субјективно во споредба со следните две димензии и може да вклучува показатели кои ги оценуваат:

- прилагодливоста и отвореноста кон промени во организацијата [222],
- проценки на знаењата/компетенциите на вработените [223],

- ефективноста на обуките [224],
- иновативноста [187], [225],
- мотивацијата на вработените [226],
- тимската работа [227] итн.

Дигитален интензитет - Дигиталниот интензитет претставува степенот на дигитализација на процесите во една компанија, односно бројот и комплексноста на дигиталните технологии кои се применуваат во секојдневното работење. Оваа димензија вклучува показатели кои покажуваат:

- стапка на дигитализација на процесите/задачите во компанијата [228],
- дигитална инфраструктура (хардвер, софтвер) [229],
- висина на инвестиции во дигитална инфраструктура [230],
- поврат на инвестициите [217] итн.

Дигитална вредност - Дигиталната вредност го претставува оперативниот ефект што го носи дигиталната трансформација врз компанијата. Оваа вредност се следи преку мерење и анализа на показатели поврзани со:

- времето,
- квалитетот,
- флексибилност,
- трошоците итн.

Иако дигиталната вредност е во фокусот на истражувањето на авторот, сепак дигиталниот интензитет и дигиталната култура се димензиите кои мораат да бидат земени во предвид за да се обезбеди одржливост на поставените дигитални решенија и показателите во производството. Тука се прави финализирање на рамката, при што во делот специфични активности се менуваат имињата на соодветните активности за мерење на ефектите од дигиталните иницијативи. Промената е дадена на Слика 4.22.



Слика 4.22 Промена на имињата на специфичните активности

4.3. Евалуирање

Изборот на методите за евалуација на рамката е даден во Прилог 2. Според методологијата, активностите во оваа фаза се:

- А6 - Бенчмаркинг
- А7 - Експертска евалуација

4.3.1. Бенчмаркинг

Согласно резултатите од трудот, избран е методот бенчмаркинг како метод за првична евалуација на рамката. Првата техника за евалуација применета врз развиената концептуална рамка е бенчмаркингот, преку кој се разгледува првата верзија на рамката со цел да се процени нејзината конзистентност и позиционирање во однос на постоечките рамки за имплементација. Врз основа на оваа бенчмаркинг анализа, рамката се доусовршува и резултира со оперативна верзија на рамката, која ги интегрира идентификуваните силни страни и адресира утврдените ограничувања во споредба со слични пристапи од литературата [231], [232].

Во случајот на рамката развиена во овој труд, таа се користи како референтна основа за евалуација во однос на сличните постојни рамки идентификувани во воведниот дел. Квалитативна бенчмаркинг анализа (со симболи за оценување) е применета со цел да се овозможи релативна споредба помеѓу рамките, прикажана во Табела 4.17.

Табела 4.17 Евалуација на рамката со бенчмаркинг

Рамка	Стратегија	Луѓе	Процеси	Технологи	Lean принципи	Мерење на учинокот	Верификација
DXcellence	●	●	●	●	●	●	●
[29]	○	◐	◐	○	◐	○	○
[24]	◐	◐	○	○	○	○	○
[30]	○	○	●	○	○	○	○
[18]	●	○	○	○	○	○	◐
[28]	◐	◐	●	○	○	○	○
[25]	●	◐	○	◐	○	○	○
[27]	◐	◐	●	◐	○	○	◐
[26]	●	○	○	○	◐	○	○

Легенда: ● - Концептот е целосно застапен, ◐ Концептот е парцијално застапен, ○ Концептот воопшто не е застапен

Резултатите од бенчмаркинг анализата укажуваат дека постоечките рамки за дигитална трансформација ги опфаќаат релевантните аспекти на трансформацијата, но најчесто ставаат акцент на избрани димензии. Дел од рамките се фокусираат првенствено на технологијата или процесите, додека други нудат ограничена интеграција на Lean принципите и недоволна примена на методи за верификација на применливоста на рамката. Во тој контекст, рамката DXcellence ја надолнува постоечката литература преку интегриран пристап што ги опфаќа сите слоеви на дигиталната трансформација. Истата е јасно ориентирана кон менаџирање на ефикасна имплементација и прилагодена на производствените системи.

4.3.2. Експертска евалуација

Експертската евалуација се состои од прашалник кој е пополнет од страна на 11 експерти од областа на дигиталната трансформација. Повеќе детали за типот на експертите се дадени на дијаграмите на Слика 4.23.

процентуални вредности беше конструиран дијаграм, кој овозможува визуелна споредба на распределбата на оценките по прашања. Вредностите во дијаграмот се пресметани според Равенка 4.1.

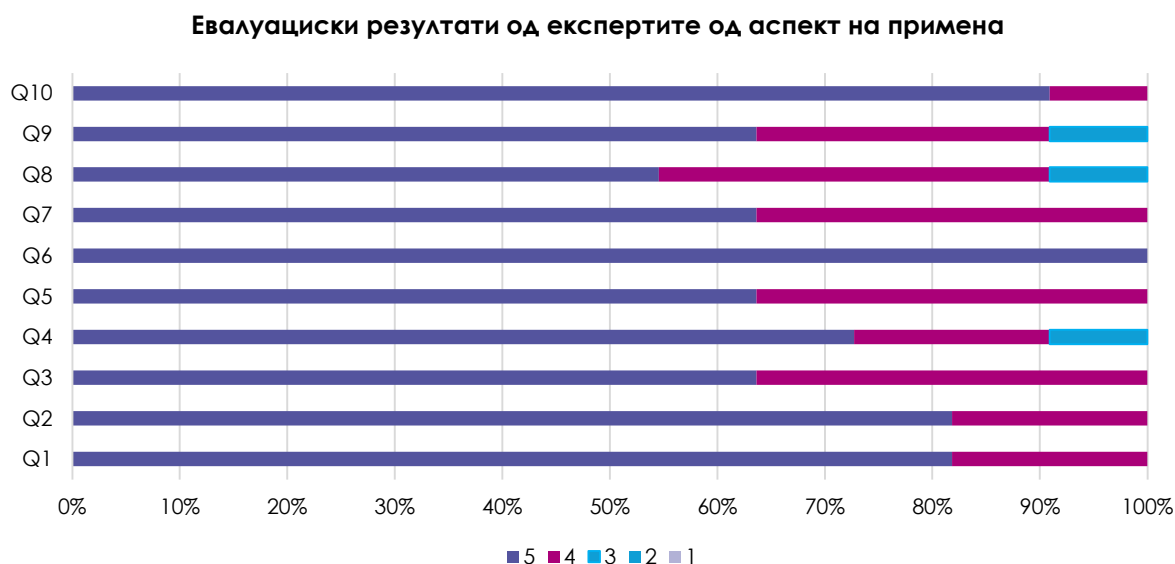
$$P_{q,k} = \frac{n_{q,k}}{N} \cdot 100 [\%] \quad (4.1)$$

Каде што:

- $P_{q,k}$ - процентуална застапеност на оценката k за q -тото прашање
- N - вкупен број на експерти, во случајов $N = 11$
- $n_{q,k}$ - број на експерти што ја дале оценката k за q -тото прашање

Со цел да се добие дијаграмската претстава на Слика 4.24, за секое прашање важи:

$$\sum_{k=1}^5 P_{q,k} = 100\% \quad (4.2)$$



Слика 4.24 Резултати од експертската евалуација

Поголемиот дел од експертите ја оценија рамката позитивно за сите прашања (Q1-Q10), при што одговорите се претежно концентрирани во повисокиот дел од скалата за оценување. Ова укажува на генерално позитивна повратна информација од рецензентите во однос на поставените прашања од анкетата. Прашањето Q6 ја доби највисоката просечна оценка меѓу сите прашања, што укажува на особено силна согласност на експертите во однос на овој аспект. Дополнително, експертите истакнаа дека рамката е релевантна, добро усогласена со својата намена и обезбедува структуриран, Lean-базиран пристап кон дигиталната трансформација во производството, при што истовремено останува лесно прилагодлива и за други индустриски сектори.

Високи оценки се забележани и кај прашањата Q1, Q2 и Q10, со што се потврдува дека и теоретската заснованост на рамката и нејзината практична применливост за имплементација во производствени системи биле оценети многу позитивно од страна на експертите. Најниските оценки се евидентирани кај прашањето Q8, кое се однесува на терминологијата користена за именување на слоевите и активностите. Иако експертите генерално ја оценија терминологијата како јасна, интуитивна и усогласена со Lean и

литературата за дигитална трансформација, дел од нив посочија дека одредени термини, особено оние поврзани со слојот „Луѓе“ и некои активности, се пошироки по значење и може да бараат дополнително појаснување. Како предлог за подобрување, беше наведено воведување на кратки дефиниции, видливи легенди или куси објаснувачки насоки, со цел да се подобри разбирливоста, особено за практичари кои не се запознаени со рамката или кои работат во различни индустриски контексти.

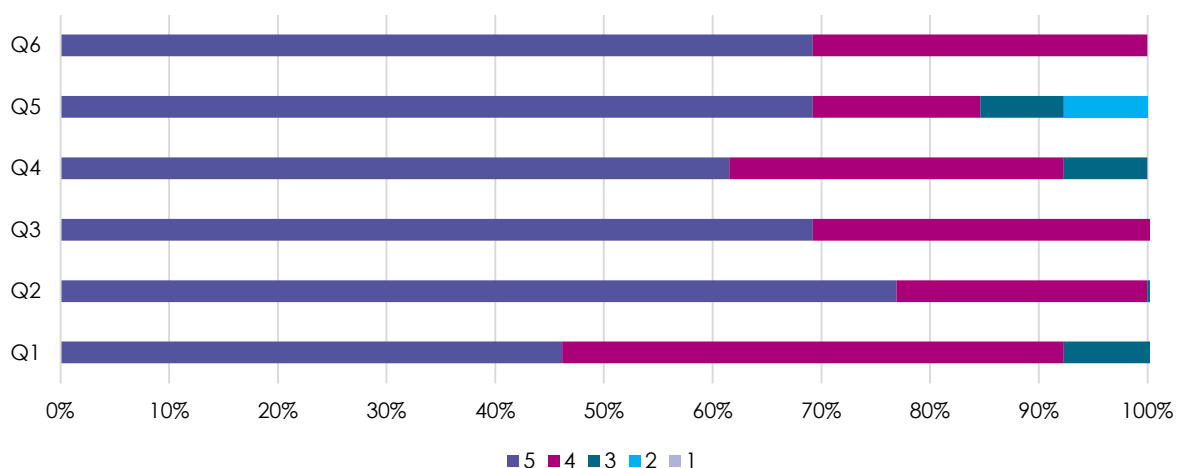
Сите прашања постигнаа просечна оценка повисока од 4,45, што укажува на високо ниво на согласност и доверба на експертите во предложената рамка.

Евалуацијата на рамката беше проширена и кон нејзината примена во едукативен контекст, со цел да се оцени разбирливоста и корисноста на рамката во процесите на настава и обука. Во таа насока беа поставени слични прашања поврзани со нејзината јасност, применливост и образовна вредност:

- Q1 - Ја разбираам потребата за рамка за дигитална трансформација во производството.
- Q2 - Рамката ми помогна да ги разберам клучните идеи на дигиталната трансформација во производството.
- Q3 - Чекорите и слоевите на рамката беа лесни за следење и логично поврзани.
- Q4 - Терминологијата и објаснувањата користени во се разбирливи за мене како студент/ка.
- Q5 - Визуелизацијата/дизајнот на рамката е соодветен.
- Q6 - Рамката ме научи нешто ново или ми даде нови перспективи за Lean и дигитална трансформација.

Студентите ја оценија рамката веднаш после предавање за истата, а анкетата ја одговорија вкупно 13 студенти. Резултатите се дадени на Слика 4.25, а дијаграмот е добиен идентично како и дијаграмот за експертската евалуација. Деталните резултати од анкетата, дадени се во Прилог 3.

Резултати од евалуацијата на корисниците од аспект на едукација



Слика 4.25 Резултати од евалуацијата на студентите

Дијаграмот покажува дека највисоките оценки (5 и 4) доминираат кај сите прашања, што укажува на генерално високо ниво на согласност и позитивна перцепција на рамката. Највисоко оценето прашање е Q6, кое се однесува на тоа дали рамката обезбедила нови знаења или перспективи за Lean и дигитална трансформација, при што речиси сите

испитаници дале највисока оценка. Ова укажува на силна едукативна и концептуална вредност на рамката.

Најниски оценки се забележуваат кај Q1, поврзано со разбирањето на потребата за рамка за дигитална трансформација, каде што иако доминираат позитивните оценки, постои поголема застапеност на оценки 3 во споредба со останатите прашања. Ова сугерира дека дел од студентите веќе имале основно разбирање на потребата од ваква рамка или им било потребно дополнително појаснување. Во однос на просечните оценки, највисок просек има Q6, односно 4,69 од 5. Најниска просечна оцена има Q6, со оцена 4,38 од 5. Сепак, резултатите од сите прашања го задоволуваат критериумот дефиниран на почетокот т.е. 75% од оцените се позитивни.

4.4. Документирање

Како завршни коментари во врска со структурирањето на рамката мора да се спомене четвртата димензија која во суштина не може да се визуелизира, димензијата на деталност на процесот на дигитална трансформација.

Со цел да се обезбеди висока флексибилност на рамката, но и поради разбирањето кон претпријатијата кои сè уште не се спремни да започнат со детално имплементирање на дигиталната трансформација, сепак процесот може да биде и поедноставен, на стратешко ниво или пак да се имплементираат само, на пример, главните активности. Поради ова секоја од претходните визуелизации може да се користи самостојно во зависност од потребата.

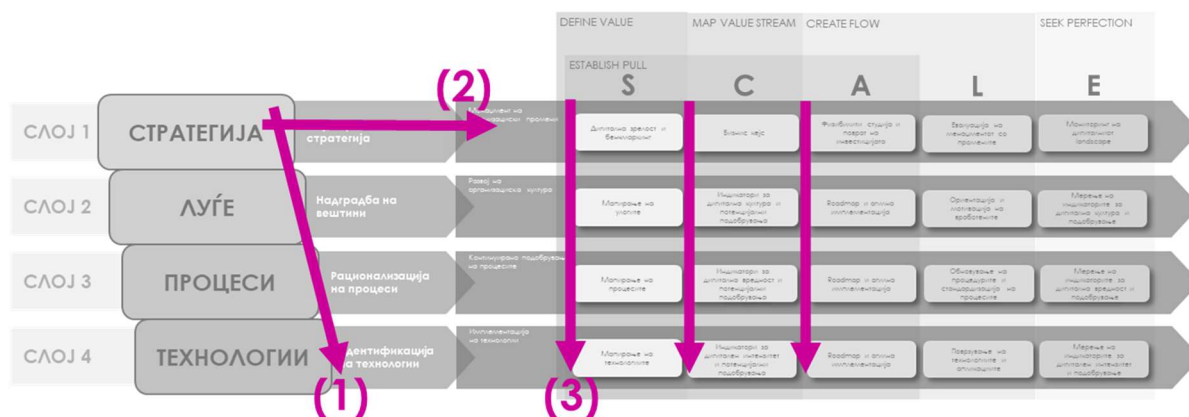
Табела 4.21 Нивоа на деталност на рамката

Деталност	Примена	Илустрација
I	– Генерална – Информативна	Слика 4.14
II	– Генерална – Стратешка	Слика 4.15
III	– Генерална – Стратешка – Планирање на потенцијални проекти	Слика 4.18
IV	– Производство – Детален проектен пристап	Слика 4.19
V	– Производство – Детален проектен пристап – Фокус на области	Слика 4.20

Треба да се напомене дека животниот циклус на рамката е хибриден. Тој комбинира елементи од водопадниот („waterfall“) и инкременталниот пристап. Стратешките и структурните активности (на пример, дефинирање на насока и воспоставување управување) следат повеќе секвенцијална логика, типична за водопадниот модел, додека иницијативите поврзани со процесите, луѓето и технологијата напредуваат итеративно и циклично, овозможувајќи континуирана повратна информација и подобрување. Оваа хибридна природа им овозможува на организациите да задржат стабилност во долгорочните цели, а истовремено да поттикнуваат агилност во оперативната имплементација. Предложениот начин на работа и следење на рамката е прикажан на Слика 9.

Рамката е наменета да се применува преку два комплементарни начини на работа, кои соодветствуваат на различни нивоа на деталност прикажани во Табела VII. Примарната примена се однесува на нивоата на деталност I - III, каде што главните

активности во секој слој се реализираат по секвенцијална, водопадна логика на имплементација (1). Откако ќе се воспостават главните активности, рамката предвидува паралелно спроведување на континуираните активности, кои остануваат активни и итеративни во текот на целиот процес на дигитална трансформација (2).



Слика 4.25 Начин на користење на рамката

Секундарната примена се однесува на нивоата на деталност IV - V и е поврзана со имплементација на конкретни иницијативи за дигитална трансформација. Во овој начин на работа, поединечните иницијативи се спроведуваат на структуриран начин (дефинирање, планирање, имплементација, интеграција и континуирано подобрување), при што се предлага истовремено да се опфатат сите слоеви со цел да се обезбеди холистичка интеграција на избраните ДТ иницијативи (3).

4.5. Согледувања и заклучоци

Ретко постои решение кое ќе ги задоволи сите барања, но дизајнот на рамката мора да се стреми кон што е можно поголема сеопфатност. Исполнување само на приоритетните барања или решавање само на приоритетните предизвици не е новост во индустриското инженерство. Многу честа практика во Студија на работата, Проектен менаџмент и Lean Six Sigma е користење на Парето принципот кој сугерира дека постигнувањето на околу 80% од вкупните резултати најчесто е можно со исполнување на релативно мал, но клучен дел од барањата. Во пракса, последните 20% од резултатот (целосно исполнување на сите барања) обично бараат непропорционално голем дел од времето, ресурсите и трошоците. Со фокусирање на оние барања кои имаат најголемо влијание врз функционалноста, перформансите и целокупниот успех на проектот, може да се обезбеди висока ефикасност и оптимално користење на ресурсите. Овој пристап е особено релевантен кога:

- ресурсите (време, пари, експертиза) се ограничени,
- постои потреба за брзо обезбедување на практично решение или прототип,
- некои од барањата се маргинални во однос на вредноста што ја носат.

Анализата и развојот на рамката за имплементација на дигитална трансформација укажуваат дека процесот на дигитална трансформација во производствените компании бара систематски и структуриран пристап кој ги интегрира организациските, процесните и технолошките аспекти. Преку дефинирањето на потребите, целите и барањата, се создава јасна почетна основа за развој на рамка која овозможува насочено и координирано планирање на активностите поврзани со дигиталната трансформација.

Во фазата на структурирање се идентификувани и систематизирани клучните барања кои произлегуваат од анализата на литературата, индустриските предизвици и научните согледувања. Овие барања се однесуваат на потребата за следење на Lean принципите, адресирање на главните организациски и технолошки пречки, како и интегрирање на научените лекции од претходни иницијативи за дигитална трансформација. Како одговор на овие барања, предложената рамка ги интегрира основните елементи на дигиталната трансформација преку дефинирање на нејзините клучни слоеви, стратегија, луѓе, процеси и технологии, како и преку систематизација на главните, континуираните и специфичните активности неопходни за нејзина имплементација.

Преглед на барањата, решенијата и начинот на нивната имплементација во рамката за дигитална трансформација, дадени се во Табела 4.18.

Табела 4.18 Начини на имплементација на барањата

Р.Б.	Рафинирано барање	Решение	Начин на имплементација
Б1	Интеграција на Lean принципите во рамката за дигитална трансформација	P13 - Да се препознаат Lean принципите во рамката за ДТ	Петте принципи се препознаваат во рамката, визуелизирани со V5
Б2	Алатки за мапирање и мерење на состојбата на дигиталната трансформација	P14 - Специфични активности за мапирање и мерење на луѓе, процеси и технологија	Фазите Clarify и Enhance јасно даваат насоки за мапирање на постоечките и мерење на посакваните показатели низ сите слоеви на ДТ
Б3	Подобрување на показателите преку имплементирани иницијативи	P15 - Специфични активности за имплементација и интеграција на иницијативи за луѓе, процеси и технологија во насока на подобрување на показателите	Фазата Apply дава насоки за имплементацијата, а фазата Link за поврзување на новите и постоечките иницијативи.
Б4	Мониторинг и континуирано подобрување на показателите по имплементација	P16 - Специфична активност - мониторинг и континуирано подобрување на показателите за луѓе, процеси и технологија	Фазите Clarify и Enhance јасно даваат насоки за мапирање на постоечките и мерење на посакваните показатели низ сите слоеви на ДТ
Б5	Развивање на основни дигитални компетенции	P1 - Задолжителна активност - „upskilling/reskilling“ за ДТ	Рамката ја класифицира оваа активност како задолжителна во слојот „Луѓе“
Б6	Ориентација на новите дигитални улоги во компанијата	P2 - Специфична активност - ориентација на дигиталните улоги	Соодветно мапирана во фазата Link
Б7	Флексибилност на рамката за примена во проекти со различен обем и нивоа од ПС	P3 - Тродимензионален модел - трета димензија ниво на имплементација	Системот за мерење може да овозможи различни нивоа на мерење.
Б8	Обезбедување на брз поврат на инвестицијата	P4 - Можност за имплементација на повеќе иницијативи од еднаш.	Рамката нагласува можност за паралелно следење на повеќе показатели и имплементација на повеќе патокази за дигитални иницијативи.
Б9	Систематски менаџмент на промените	P5 - Континуирана активност - менаџмент на промени во текот на целата трансформација	Во слојот Стратегија, како задолжителна континуирана активност се јавува менаџментот со промени
Б10	Идентификува стратегија според која треба да се води трансформацијата	P6 - Задолжителна активност - воспоставена (дигитална) стратегија	Во слојот Стратегија, како задолжителна активност се јавува поставување на стратегија
Б11	Методолошки дефиниран пристап во имплементацијата на ДТ	P7 - Самата рамка го решава овој предизвик.	Рамката директно го адресира барањето.
Б12	Оптимизација/рационализација на процесите пред имплементација на дигиталните иницијативи	P8 - Задолжителна активност - рационализација на процесите пред ДТ - согласно истражувањето Lean пред ДТ	Во слојот процеси, како задолжителна активност се јавува рационализација на процесите пред нивно подобрување.
Б13	Логичен редослед на имплементација на слоевите на рамката	P9 - Стратегија - Луѓе - Процеси - Технологија	Согласно литературата даден е логичен редослед на слоевите.
Б14	Логичен редослед на имплементација на главните активности	P10 - Преглед на главните активности од секој слој - според прегледот на литературата	Со искористување на постоечки рамки и литература за главни активности во сите слоеви односно фази, препорачани се главни активности за кои претпријатијата треба да обезбедат соодветни процеси и ресурси за нивна имплементација пред да се започне со дигиталните иницијативи во соодветните слоеви.
Б15	Логичен редослед на имплементација на континуираните активности	P11 - Преглед на континуираните активности од	Со искористување на постоечки рамки и литература за континуирани активности во сите слоеви односно фази, препорачани се

Р.б.	Рафинирано барање	Решение	Начин на имплементација
		секој слој - според прегледот на литературата	континуирани активности за кои претпријатијата треба да обезбедат соодветни процеси и ресурси за нивна имплементација во текот на дигиталната трансформација.
Б16	Логичен редослед на имплементација на специфичните активности	P12 - Преглед на специфичните активности и нивен распоред	Со искористување на постоечки рамки и литература за специфични активности во сите слоеви односно фази, дадени се примери за специфични активности и нивен предлог-распоред кој не мора да значи дека е единствен.

Дополнително, интеграцијата на Lean принципите во рамката обезбедува стабилна основа за елиминација на загубите и оптимизација на процесите пред или паралелно со воведувањето на дигиталните технологии. Ваквиот пристап овозможува дигиталната трансформација да се реализира на веќе стабилизирани и оптимизирани процеси, со што се намалуваат ризиците од неефикасна имплементација на технологиите.

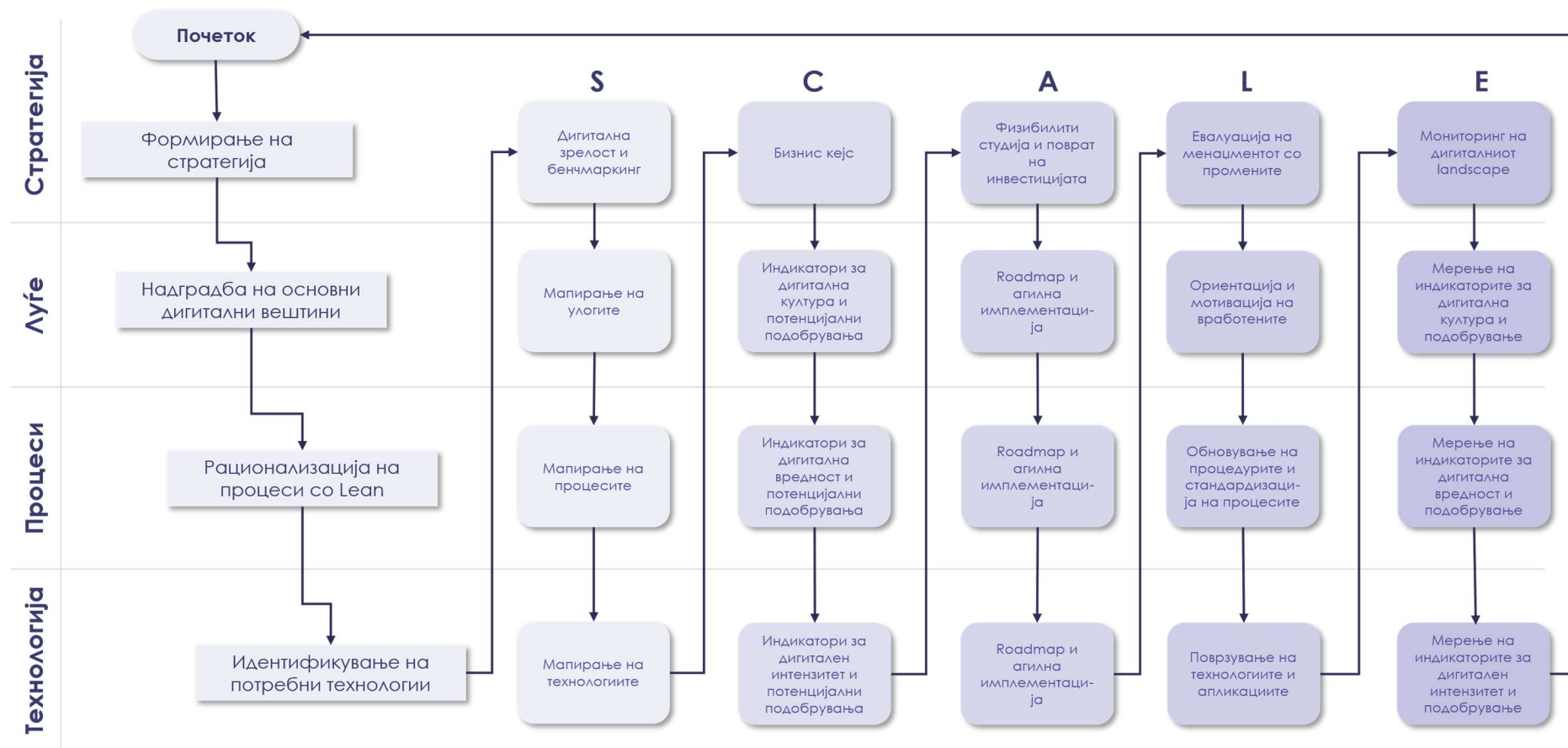
Во рамката исто така е дефинирано и нивото на имплементација на дигиталните иницијативи, како и деталите поврзани со мерењето на дигиталната трансформација, што овозможува нејзино систематско следење и евалуација. Фазата на евалуирање, преку бенчмаркинг анализа и експертска евалуација, обезбедува дополнителна проверка на применливоста, конзистентноста и релевантноста на предложената рамка.

Иако целта на дисертацијата не е да развие чекор по чекор имплементација, водејќи се по логиката на Lean која е отворен филозофија. Развојот на рамката ги дава основните насоки за размислување и дејствување на претпријатието, но начинот на користење треба да се прилагоди на истото. Во продолжение, на Слика 4.26, даден е модифициран дијаграм на тек, во форма на „swimlane“ дијаграм.

Swimlane дијаграмот прикажува логичен и структуриран редослед на активности за дигитална трансформација низ четирите слоеви: стратегија, луѓе, процеси и технологија. Процесот започнува со „водопад“ принцип на извршување на четирите главни активности во секој од слоевите.

Вертикално, специфичните активностите се организирани според SCALE моделот (Sketch, Clarify, Apply, Link и Enhance), при што секоја наредна фаза се надоврзува на претходната. Повратната врска на крајот од дијаграмот покажува дека процесот е цикличен, односно резултатите од мониторингот и мерењата повторно се користат како влез за ревидирање на стратегијата, идентификација на нови подобрувања и започнување на нов циклус на иницијативи за дигитална трансформација.

Врз основа на направените анализи може да се заклучи дека предложената рамка претставува интегриран и структуриран пристап за имплементација на дигитална трансформација во производствените компании. Таа ги обединува клучните концепти на Lean менаџментот и дигиталните технологии, овозможувајќи јасно дефинирање на активностите, приоритетите и механизмите за следење на резултатите. Со тоа рамката претставува практична основа за систематско планирање и имплементација на дигитални иницијативи во индустриската практика, особено во средини со пониско ниво на дигитална зрелост.



Слика 4.26 Swimlane дијаграм за користење на рамката

5. СТУДИИ НА СЛУЧАИ

Ова поглавје ги презентира студиите на случаи преку кои се спроведува имплементација и верификација на предложената рамка за дигитална трансформација, преку мерење на учинот од воведените дигитални иницијативи во услови на фабрика за учење. Имајќи ги предвид ограничувањата за целосна имплементација, особено во поглед на време и финансиски ресурси, истражувањето се базира на парцијална имплементација во контролирана лабораториска средина. Во овој контекст, фабриката за учење претставува соодветна експериментална платформа која овозможува конфигурација и тестирање на повеќе производствени сценарија под стандардизирани услови, со значително намалување на потребното време и трошоци. На овој начин, се овозможува ефикасна и економична верификација на предложената рамка, при задржување на релевантноста и применливоста на добиените резултати.

Имплементацијата и верификацијата на рамката е изведена преку искористување на различните производствени модули во фабрика за учење, за создавање производствени сценарија со различна дигитална зрелост, мерење и анализа на показатели за дигитална вредност, дигитална култура и дигитален интензитет, користејќи реален производ и извршители во текот на експериментите.

За полесно читање на трудот, во контекст на фабриките за учење, во продолжение се дефинирани неколку клучни термини кои понатаму ќе бидат користени:

- **фабрика за учење** - претставува симулирана производствена средина (производен систем), наменета за обука и истражување.
- **модул** - модул во фабрика за учење претставува самостојна единица, која може да биде опрема, инвентар или софтвер (или комбинација од нив), која е дизајнирана да изведува или поддржува одредена производствена функција, и која може лесно да се помести во процесниот тек, комбинира, замени или надополни со други модули.
- **производ** - е физичката целина (дел, склоп, прототип) која се произведува со помош на модулите и низ производствените сценарија во фабриката за учење.
- **сценарио** - производствено сценарио претставува структуриран опис на различни услови под кои се изведува производствениот процес во фабриката за учење.
- **показател** - показател претставува големина што се мери и анализира со цел да даде квантитативна оценка на успешноста на производствениот процес низ сценаријата.

Различните конфигурации на модулите (инвентарот, хардверските и софтверските решенија во Smart Learning Factory - Skorje) во ова истражување се репрезент на различни конфигурации на потенцијални производни претпријатија со различно ниво на зрелост, пред сè дигитална зрелост. Табела 5.1 Споредба на реални претпријатија со фабрики за учење дава споредба во однос на неколку критериуми на истражувањето во реални претпријатија наспроти истражувањето во фабрики за учење.

Според споредбата во Табела 5.1, може да се заклучи дека фабриките за учење овозможуваат истражувања кои се спроведуваат во контролирана средина која нуди стандардизираност на голем број на аспекти низ сите производни сценарија.

Табела 5.1 Споредба на реални претпријатија со фабрики за учење

Критериум	Реални претпријатија	Фабрики за учење
Производ	Различни производи	Еден ист производ
Производен процес	Исти/слични технологии - различен тек.	Исти технологии, стандардизиран тек.
Инфраструктура	Различни производители на опремата.	Иста опрема за една функција.
Стандарди	Исти/слични стандарди. Интерни стандарди.	Исти стандарди. Исти интерни стандарди.
Транспорт	Различен од компанија до компанија.	Ограничен простор за изведба на сценаријата - транспортот е со слична должина.
Извршители	Различни, со различно ниво на едукација, искуство, возраст и компанијска култура.	Исти за сите сценарија, слично ниво на едукација и возраст, релативно мало искуство.

Благодарение на тоа што производот, инфраструктурата, стандардите и извршителите се идентични за сите сценарија, се елиминираат варијациите што во реалните претпријатија би произлегле поради различноста на овие фактори од претпријатие до претпријатие. Ова овозможува фокус на анализирање на производниот процес, транспортните текови и ефектите на воведените технологии, без дополнителни влијанија од надворешни фактори. На тој начин фабриките за учење се исклучително погодни за истражувања насочени кон споредување на сценарија, тестирање на нови методологии и алатки, како и за развој/потврдување на унифицирани знаења и практики кои можат да се пренесат во индустријата. Дополнително, поради контролираниот и затворен карактер на ваквите системи, експериментите можат полесно да се спроведуваат со минимално влијание од надворешни фактори, овозможувајќи посигурно поврзување на добиените резултати со промените воведени во самите сценарија.

Концептот за фабриките за учење за прв пат е претставен на Универзитетот Пен Стејт во САД, а истиот е даден на Слика 5.1, прилагоден според [233]. Сликата го прикажува концептот на фабрика за учење како интегрирана платформа што ги поврзува индустријата, професорите и студентите. Преку оваа поврзаност се овозможува усогласување на наставата со реалните индустриски потреби, практично вклучување на студентите и развој на релевантни компетенции. Во центарот, фабриката за учење ја нагласува својата улога како мост помеѓу теоријата и практиката.

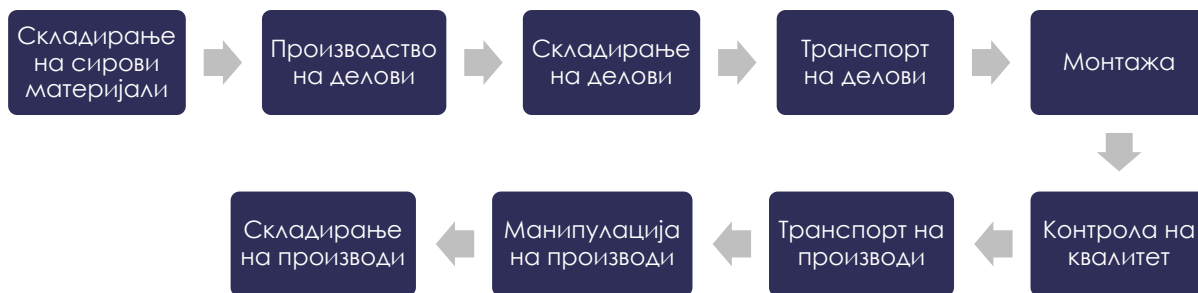
Ова поглавје опфаќа детален опис на фабриката за учење која е искористена како тест околина, опис и технички спецификации на производот кој е искористен во текот на производниот процес, опис на производствените сценарија дизајнирани за оваа цел. Вториот дел од поглавјето опфаќа избор на клучни показатели и дефинирање на план за мерење и собирање на податоците за показателите. Резултатите од мерењата се прикажани заедно со соодветни теоретски објаснувања и формули за пресметка на поединечните показатели, проследени со анализа и дискусија. Последниот дел го опишува начинот на визуелизација за имплементација во концепт менаџмент информациски систем за следење на влијанието на дигиталните решенија на избрани производствени показатели во Smart Learning Factory - Скопје.



Слика 5.1 Концепт на фабрики за учење според Универзитетот Пен Стејт

5.1. Smart Learning Factory - Skopje

Smart Learning Factory - Skopje (SLFS) е опремена со модуларна опрема (хардвер, софтвер и останат инвентар) кој може да се конфигурира по потреба на корисниците. Модулите од кои моментално се состои SLFS одговараат на најчестите производствени операции што ги има едно просечно производствено претпријатие (Слика 5.2).

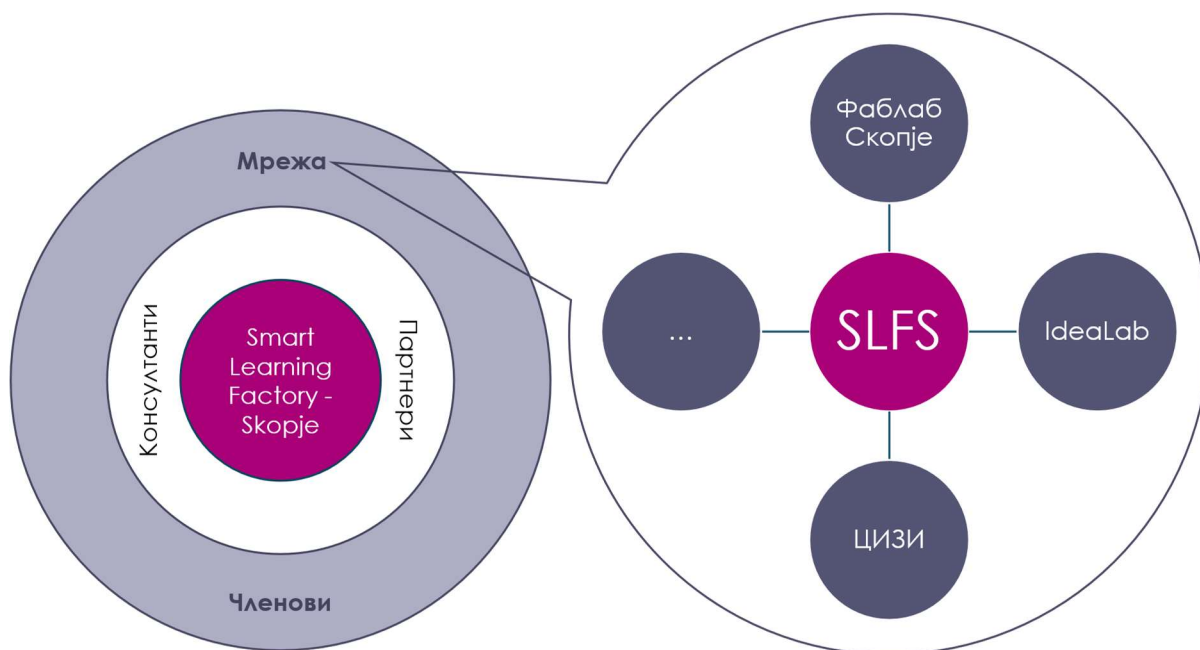


Слика 5.2 Чекори на едно просечно производствено претпријатие

SLFS е основана во 2023 година и е лоцирана на Машинскиот факултет при Универзитетот „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје. Со неа управува тим од Катедрата за Индустриско инженерство и менаџмент. Главната цел на Smart Learning Factory - Skopje е да се создаде симулирана околина за учење на концепти од производството. Фокусот е ставен на Lean менаџментот и Индустрија 4.0, при што фабриката за учење претставува мост меѓу академијата и индустриската практика. Активностите (воедно и услугите) на SLFS, најдобро се претставени преку нејзините четири столба:

- „showroom“ - за прикажување на нови технологии,
- лабораторија - за експериментирање со нови производствени сценарија,
- тренинг центар - за надградба на вештини,
- развоен хаб - за интегрирани решенија за индустријата.

За SLFS, карактеристичен е екосистемот во кој таа функционира, при што лабораторијата не претставува изолиран ентитет, туку е интегрирана платформа за соработка, прикажан на Слика 5.3.



Слика 5.3 Екосистем на SLFS

Во рамки на овој екосистем, SLFS овозможува интердисциплинарна соработка помеѓу студенти, истражувачи, индустриски партнери и јавни институции. Синергијата помеѓу лабораториите овозможува споделување на ресурси, знаење и инфраструктура, што придонесува за побрз трансфер на знаење од академијата кон индустријата и обратно.

Фабриците за учење (ФУ) како SLFS, се предмет на голем број на научни трудови, главно поради нивната популарност во последната деценија. Според [234] постојат стандардни и дополнителни барања за дизајнирање на фабриците за учење. Притоа, овие барања не се однесуваат исклучиво на физичката опрема и технологиите, како кај традиционалните лаборатории, туку се однесува на многу повеќе димензии (на пр., стратегија, дидактички концепти, бизнис модел итн.). Табела 5.2, дава преглед на барањата за фабриците за учење, поделени во шест димензии, проследени со коментари за нивна имплементација во SLFS. Со црвена боја дадени се дополнителни барања.

Табела 5.2 Барања за фабриките за учење и имплементација во SLFS

Димензија	Барање	Имплементација
Оперативен модел ФУ треба да има одржлив оперативен модел	Развојот и работата на ФУ треба да биде одржлив и ефикасен. ФУ треба континуирано да ги следи индустриските иновации. Потребно е да постои финансирање, персонал и објект за развој, работа и подобрување на ФУ.	SLFS нуди голем број на стандардизирани услуги и дидактички концепти кои одговараат на основните, но и на напредните трендови од областите.
Цел ФУ треба да има јасна цел, области и таргети.	Главната цел на ФУ треба да биде учење преку образование, обука и/или истражување. Причината за постоење, целите и содржината на ФУ треба биде обликувана според барањата на таргет групите.	Темите, процесот и услугите се целосно развиени според барањата на таргет групите.
Процес ФУ треба да има јасна цел, области и таргети.	Процесот во ФУ треба да биде автентичен, со повеќе фази и да вклучува технички и организациски аспекти. ФУ треба да има флексибилен процес. ФУ треба да опфаќа процес/и обликувани според барањата на таргет групите. Процесот во ФУ треба да одговара и да ги поддржува сите барања на производот на ФУ. ФУ треба да опфаќа широк обем на процеси од животниот циклус на производот. ФУ треба да адресира предизвици на сите нивоа на една фабрика низ целиот вредносен систем.	Процесот во SLFS е типичен производствен процес за индустријата, се состои од повеќе фази и вклучува технички аспекти (производство, монтажа) и организациски (5S, Kanban) аспекти.
Поставеност/распоред ФУ треба да има производствена околина за учење.	Поставеноста на ФУ треба да претставува реален вредносен синџир. Поставеноста на ФУ треба да вклучува повеќе работни станици (физички или виртуелни) ФУ треба да има променлива и флексибилна поставеност. Поставеноста на ФУ треба да обезбеди пристап и мобилност помеѓу модулите. ФУ треба да обезбеди можност за различни големини на групи од учесници/слушатели.	SLFS има над десет различни работни станици вклучувајќи станици за производство, монтажа, логистика, транспорт, квалитет итн. Сите станици се модуларни и нивниот распоред може да се промени.
Производ LF треба да има јасна цел, области и таргети.	Производот на ФУ треба да биде што е можно посличен на реален индустриски производ. ФУ треба да има променлив и флексибилен производ. Производот на ФУ треба да одговара на процесот и распоредот на ФУ. Производот на ФУ треба да биде избран според потребите на таргет групите. Производството на производот на ФУ треба да биде одржливо.	SLFS располага со повеќе реални и дидактички производи. Еден од реалните производи ќе биде искористен во овој труд.
Дидактика LF треба да има јасна цел, области и таргети.	Дидактичкиот концепт треба да се состои од формално и неформално учење. Дидактичкиот концепт треба да вклучува методи за активно учење. Дидактичкиот концепт треба да биде опишан преку таргетираните компетенции, learning outcomes, начини на учење и предавање и евалуација на learning outcomes.	Главниот дидактички концепт во SLFS е гејмификација на учењето, како и различните стандардизирани сценарија за производство.

Според [235], постои стандардизирана морфологија преку која се дефинираат фабриките за учење. Морфологијата на SLFS е дадена во Табела 5.3.

Табела 5.3 Морфологија на Smart Learning Factory - Skopje

Карактеристики	Функционалности					
Главна цел	Едукација	Тренинг	Истражување			
Секундарна цел	Тест околина	Индустриско производство	Трансфер на иновации	Јавен имиџ		
Производен циклус	Планирање	Развој на производ	Прототипирање	Производство	Монтажа	Логистика

Карактеристики	Функционалности					
Организација	Инвестиции	Производни системи	Планирање на процеси	Производство	Монтажа	Логистика
Нарачки	Конфигурација и нарачки	Распоред на нарачки	Планирање и распоред	Производство	Монтажа	Логистика
Технологија	Планирање	Развој	Виртуелно тестирање	Производство	Монтажа	Логистика
Индиректни функции	Логистика	Маркетинг и продажба	Услуги	Опрема	ЧР	Набавки
Околина за учење	Чисто физичка околина	Физичка со елементи на дигитална фабрика	Физичката околина продолжена виртуелно	Чисто виртуелна околина		
Размер	Намален	Реален				

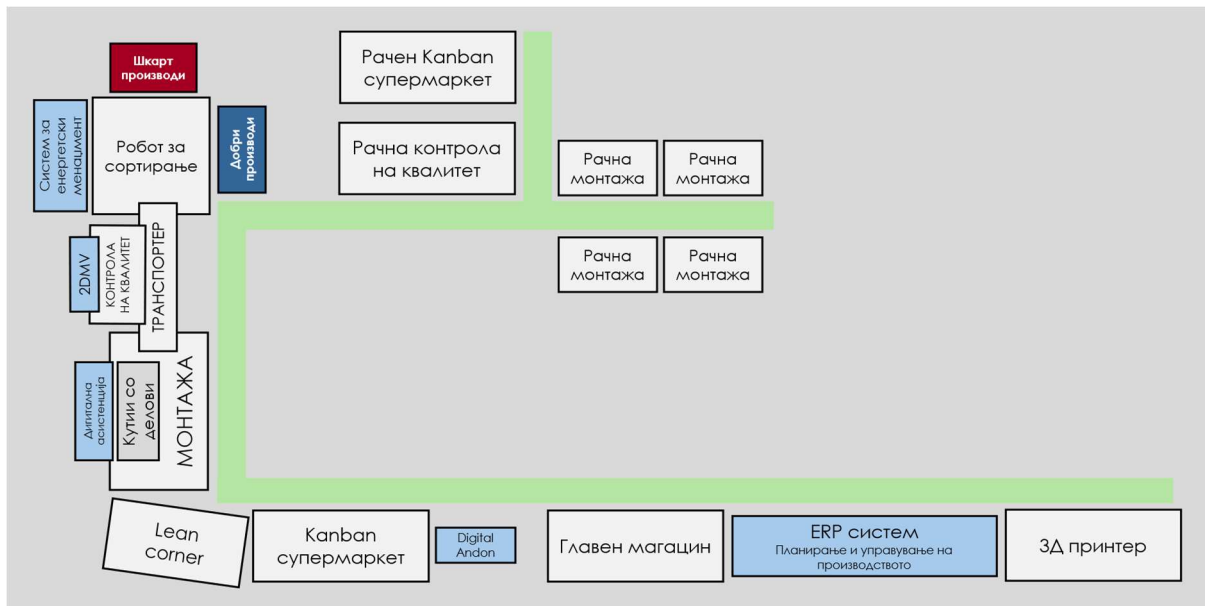
Образецот за морфологијата на фабриките за учење, согласно изворот, треба да биде стандардизиран за сите фабрики за учење, со тоа што се обележуваат полињата кои се апликативни за соодветната фабрика за учење. Во случајов, со темно зелено обележани се обележјата кои се апликативни за SLFS, додека со светло зелено се оние кои се делумно застапени во работата.

Еден од најважните аспекти за фабриката за учење е нејзината инфраструктура (простор, хардвер, софтвер и останат инвентар) преку која се остваруваат процес, поставеност, производ и дидактика. На Слика 5.4 е инфраструктурата на SLFS. Во студиите на случаи, не се вклучени сите модули на SLFS.



Слика 5.4 Инфраструктура на SLFS

2Д поглед на инфраструктурата заедно со некои клучни димензии на базичниот распоред на SLFS е даден на Слика 5.5.



Слика 5.5 2Д цртеж од распоред на Smart Learning Factory - Skopje

Како што е напоменато претходно, секоја ФУ треба да има и соодветен производ, а SLFS, во текот на своето работење има усвоени неколку различни производи, од кои за истражувањето во продолжение е избран еден.

5.2. Основни информации за истражувањето

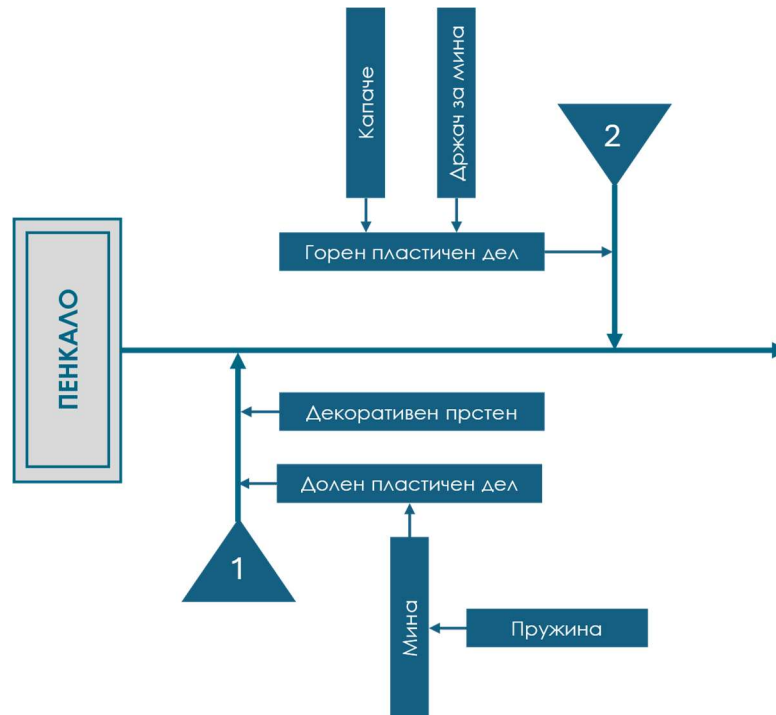
5.2.1. Производ

Производот кој е избран за ова истражување е едноставно пенкало, чиј 3Д модел е прикажан на Слика 5.6.



Слика 5.6 Избран производ за монтажа при студиите на случаи

Со оглед на тоа што се работи за процес на монтажа на пенкалото, на Слика 5.7 дадена е и шемата за монтажа. Деталното упатство за монтажа кое го имаат на располагање учесниците во истражувањето е дадено во Прилог 4.



Слика 5.7 Шема за монтажа

5.2.2. Производствени сценарија

Како што е претходно дефинирано, производствено сценарио претставува структуриран опис на различни услови, под кои се изведува производствениот процес во фабриката за учење. Различните производствени сценарија можат да се разликуваат во голем број на аспекти, како на пример начинот на организација на работата, распоредот на опремата, искористените дигитални технологии, производствените технологии, бројот/профилот на извршители, надворешните влијанија итн.

Слично како и кај компјутерските симулациски модели, каде сценариото претставува виртуелен модел на сегашна или идна состојба на системот, кој дозволува тестирање на хипотези без нарушување на производството, кај фабриките за учење, разликата е во тоа што овие сценарија можат физички да се имплементираат и реплицираат со цел истражувањето и учењето се приближат што е можно повеќе до реалните услови. Кај првите и кај вторите типови на сценарија, нема нарушување на производството при промена на сценаријата поради тоа што фабриките за учење иницијално не се наменети за реално производство и опремата е најчесто дидактичка.

За ова истражување, дизајнирани и/или документирани беа вкупно шеснаесет производни сценарија кои подоцна се класифицирани во различни групи за анализа. Некои од сценаријата се само документирани на стандарден начин како и останатите бидејќи истите веќе постоеле од претходно.

Секое од шеснаесетте сценарија се дефинирани на стандарден начин преку име на сценарио, шема на сценарио, дијаграм на тек, опрема која е вклучена во сценариото, дигитални уреди, софтвери и технологија.

Во Прилог 5 дадена е целосната табела со информациите за сите сценарија, додека во продолжение кратко ќе бидат објаснети две карактеристични сценарија, и тоа Сценарио 3 и Сценарио 9.

На Слика 5.8, даден е распоредот на опремата, извршителот и патеката на движење во Сценарио 3. Паралелно даден е дијаграм на тек, како и инфраструктурата која е вклучена во сценариото, со дополнителна поделба на дигитални уреди и софтвер. Чекорите во дијаграмот на тек кои се истакнати со рамка и задебелен текст, се чекори во кои е употребена дигитална технологија. Во последната колона, дадени се технологиите на Индустрија 4.0, а истакнати се оние кои во одредена форма се искористени во сценариото.

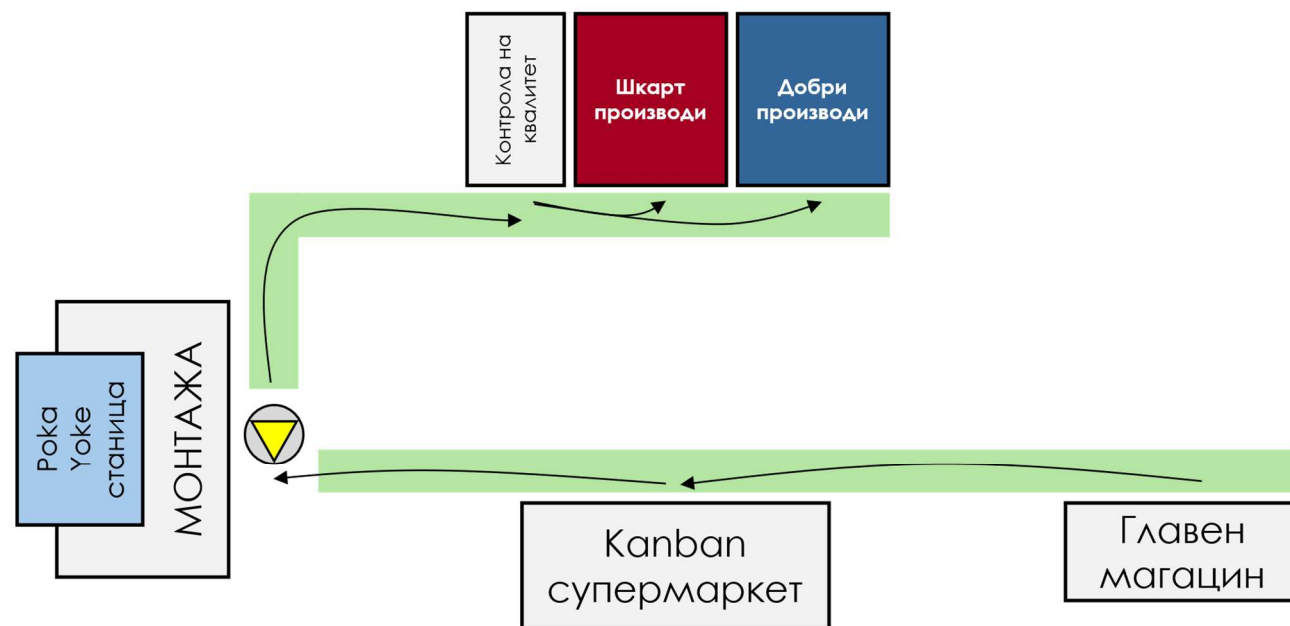
Третото сценарио започнува со снабдување на Kanban супермаркетот и станицата за монтажа со потребните делови од главниот магацин. На станицата за монтажа, извршителот започнува со склопување на производот, каде истиот е воден од страна на Smart PoKa YoKe уредот, во кој претходно е интегриран редоследот за монтажа на пенкалото. Откако производот е монтиран, истиот рачно се пренесува до станицата за контрола на квалитет, каде производот се проверува согласно стандардизирана чек-листа за контрола на квалитетот, а согласно резултатот, се одлага или на станицата за шкарт (доколку не ги задоволува потребните карактеристики) или на станицата за добри делови.

Како второ карактеристично сценарио избрано е Сценарио 8, дадено на Слика 5.9. До монтажата, процесот е целосно ист како и кај Сценарио 3, после монтажата, наместо пенкалата рачно да се пренесуваат до контрола на квалитет, тие се поставуваат на транспортер, кој истите ги транспортира до роботот за сортирање. Во меѓувреме, над транспортерот е поставена камера за машинска визија која ги проверува деловите од аспект на димензии. Врз основа на оваа информација, роботот ги распределува деловите на страната на добри или на страната на лоши делови со што завршува процесот.

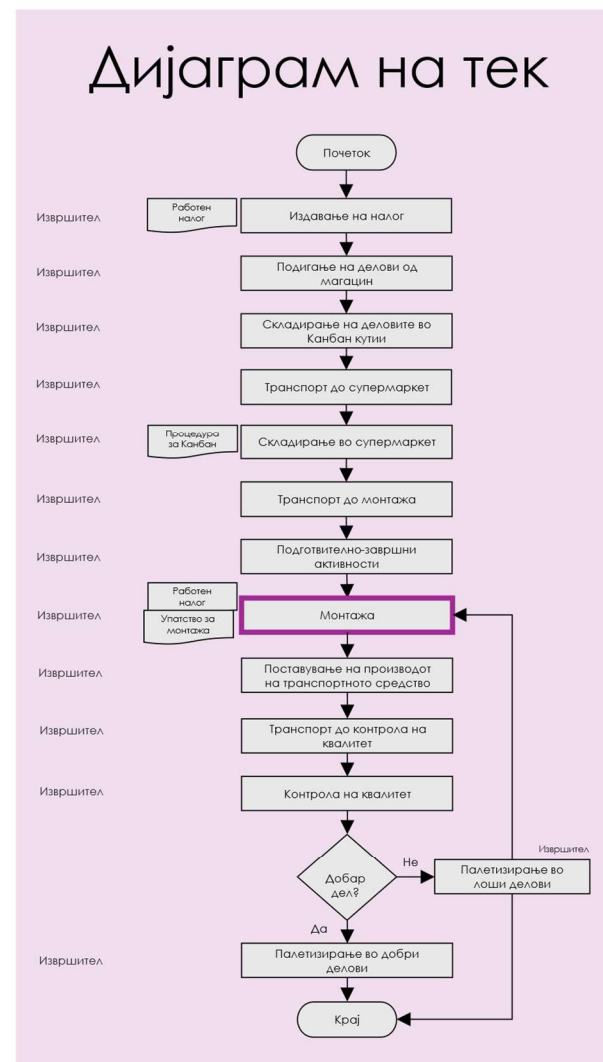
Во Прилог 5 дадени се и две идни состојби односно проектирани сценарија кои би можеле да се испитуваат во иднина доколку се имплементира и интегрира соодветната опрема. Идејата со дополнителните две сценарија е да се прикаже покриеност на сите чекори од дијаграмот на тек на процесот со барем една дигитална функција.

СЦЕНАРИО 3

Smart Poka Yoke – дигитален систем за асистенција на извршителот при монтажа

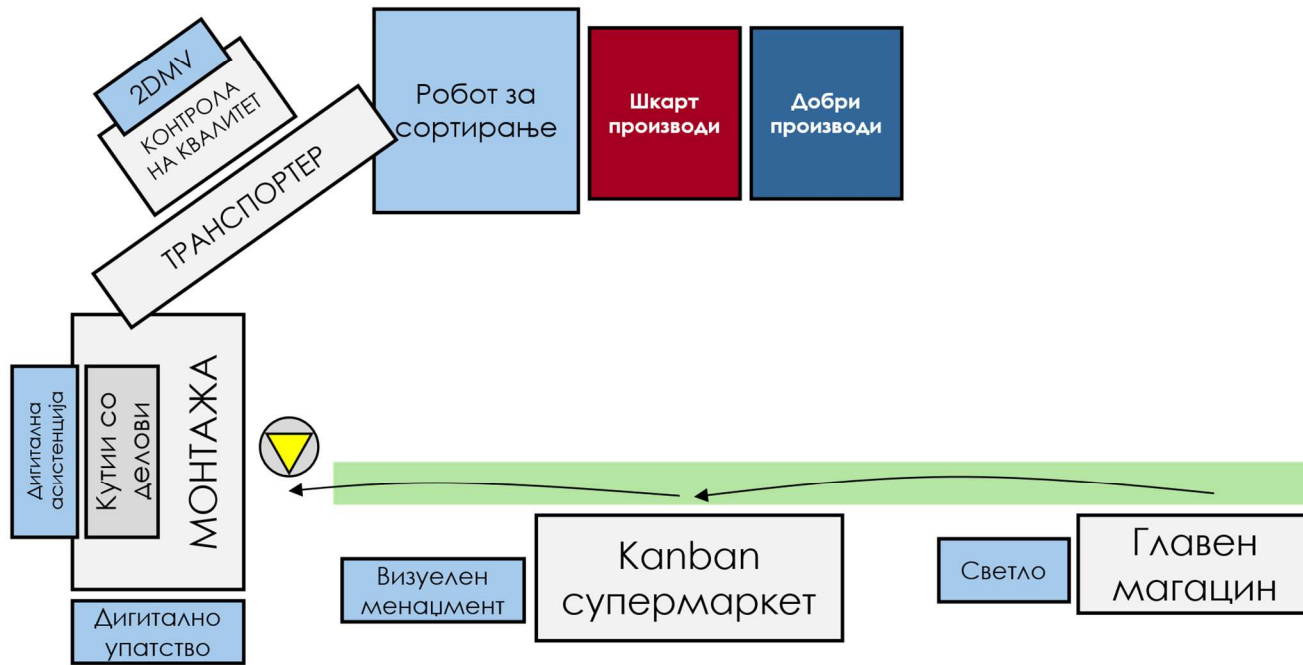


Слика 5.8 Карактеристично сценарио - Сценарио 3

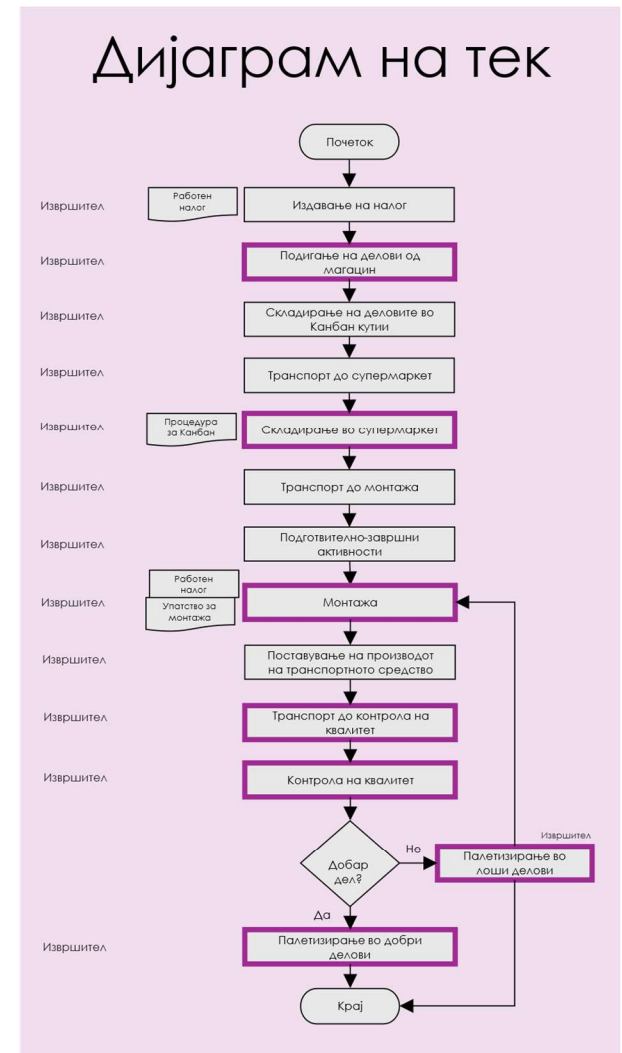


СЦЕНАРИО 9

Имплементација на дигитален визуелен менаџмент



Слика 5.9 Карактеристично сценарио - Сценарио 9



5.2.3. Показатели за учинокот

За да се прикаже влијанието од имплементацијата на дигиталните технологии, избрани се показатели што ги опфаќаат трите слоеви на предложената рамка за дигиталната трансформација: луѓе (показатели за дигитална култура - ДК), процеси (показатели за дигитална вредност - ДВ) и технологии (показатели за дигитален интензитет - ДИ). Дополнително, вклучен е и еден стратешки показател кој ја прикажува севкупната зрелост на секое сценарио, при што сценаријата се третираат како посебни претпријатија.

Показателите за производство можат да произлегуваат од постоечки стандарди, релевантна литература или да бидат развиени/изведени од останатите, согласно конкретните потреби. Во ова истражување се користат показатели од сите три извори. Потеклото на КРП не е од пресудно значење, клучно е тие да бидат соодветни за конкретната организација и да овозможат проценка на перформансите во однос на организациските цели и вредноста што треба да се испорача.

Показателите поврзани со слојот „Процеси“, односно показателите за дигитална вредност се во фокусот на овој труд. Како извор на потенцијални показатели, покрај другите литературни извори, примарно ќе се користи стандардот ISO 22400-2:2014 Системи за автоматизација и интеграција - Клучни показатели за успешност (KPI) за менаџмент на производствени операции - Дел 2: Дефиниции и описи (Automation systems and integration - Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management - Part 2: Definitions and descriptions). Овој стандард дефинира голем број на показатели, од кои потребно е да се изберат само релевантните за истражувањето. Важно е да се напомене дека литературата поврзана со анализа на овој стандард посочува дека некои од начините за пресметка на показателите дадени во стандардот можеби не се директно апликативни за сите организации, но истите можат да бидат прилагодени, што е и направено во текот на студиите на случаи во оваа дисертација. Исто така литературата напоменува дека потребно е надолнување на стандардот со одредени показатели кои сега не се дел од стандардот, а се идентификувани како важни за организациите [236].

Показателите за останатите два слоеви на дигитална трансформација („Луѓе“ и „Технологи“) се бидат избрани согласно литературни извори кои ги дефинираат истите, или се создадени специјално за потребите на фабриката за учење. За разлика од показателите кај слојот „Процеси“, за овие два слоеви нема стандард кој ги пропишува показателите, а литературата јасно посочува дека ова се сепак две засебни области за чие разбирање е потребно многу поголемо предзнаење, покрај од инженерски, од социјални и економски области.

Со цел да се изберат најрелевантните показатели за слојот „Процеси“ за мерење во експерименталниот дел од оваа дисертација, најпрво сите показатели од стандардот се класифицирани на три групи на показатели поврзани со мерењето на учинокот на производните системи: време, квалитет и трошоци [237]. Потоа, со користење четири елиминаторни критериуми (поради големиот број на показатели, бројот на елиминирани би требало да е поголем), се врши избор на најсоодветните показатели за Smart Learning Factory - Skorje. Критериумите се наредени по важност, започнувајќи од најважниот:

- **K1** - Релевантен за процесот во SLFS
- **K2** - Реалистичен за мерење во SLFS
- **K3** - Дава генерална слика за процесот во SLFS
- **K4** - Осетлив на промена во сценаријата

За оваа цел може да се разгледуваат и други уште подетални критериуми како на пример: разбирливост за извршителите, повторливост за следни истражувања итн.

Резултатите од користењето на методот “Задолжителен критериум” за избор на показателите се дадени во

Табела 5.4. Согласно методот, доколку некој од показателите не задоволува барем еден од критериумите, истиот не се зема предвид во понатамошната експериментална анализа [238]. Методот не ги разликува критериумите за избор по нивната важност со тежински фактори, туку дава предност на првиот, кој се смета за најважен критериум од листата, прв да елиминира варијанти (во случајов показатели) од листата. Во табелата, „У“ значи дека показателот нема да се мери туку од практични причини ќе биде усвоен согласно искуства или моментална состојба во SLFS, „✓“ значи дека показателот го задоволува условот, а „X“ значи дека показателот не го задоволува критериумот и истиот не се разгледува понатаму низ следните критериуми. Со сина боја обележани се показателите кои се избрани за усвојување, мерење и пресметка во студиите на случаи.

Во Поглавје 5.4, при објаснувањето на избраните показатели, дадени се и дополнителни анализи за нивната потенцијална примена во SLFS, заедно со нивна дефиниција во контекст на експериментот, начинот на пресметка и податоците од реалните мерења. Во табелата во продолжение, дадени се показателите според нивните имиња во стандардот.

Табела 5.4 Избор на показатели за мерење со методот „Задолжителен критериум“

Показател (Ознака)	K1	K2	K3	K4
Времетраење на нарачка (POT)	Х			
Оперативно време (OT)	Х			
Планирано подготвително-завршно време (PSUT)	Х			
Продуктивност на работникот, <i>Worker productivity</i>	✓	✓	Х	
Планирано распределено време (PBT)	Х			
Производно време по парче (PTU)	Х			
Време на работа (WOT)	У			
Процесно време (PCT)	✓	✓	Х	
Време кога машината работи (BT)	Х			
Време на извршување (TPT)	✓	✓	✓	✓
Работно време без паузи (TAT)	У			
Технолошко време (PDT)	✓	✓	✓	✓
Време на чекање (LZ)	Х			
Операторско време (PZ)	Х			
Времетраење на застои (DOT)	✓	✓	✓	✓
Прекини предизвикани поради дефект (SU)	Х			
Реално подготвително-завршно време (ESUT)	✓	✓	✓	✓
Транспортно време (TT)	✓	✓	✓	Х
Количина на нарачка (POQ)	У			
Количина на шкарт (SQ)	✓	✓	✓	✓
Планирана количина на шкарт (PSQ)	Х			
Количина на добро произведени парчиња (GQ)	✓	✓	✓	✓
Обрт на залиха	Х			
Количина на доизработени парчиња (RQ)	✓	Х		
Количина на вкупно произведени парчиња (PQ)	✓	✓	✓	✓
Добри парчиња (GP)	✓	✓	✓	✓
Тестирани парчиња (IP)	✓	✓	Х	
Аритметичка средина (\bar{x})	✓	Х		
Максимална дозволена вредност (ULV)	✓	Х		
Стандардна девијација (s)	✓	Х		
Процентна вредност (σ)	✓	Х		
Минимална дозволена вредност (LLV)	✓	Х		
Варијација, <i>Variance</i> (σ)	✓	Х		

Показател	K1	K2	K3	K4
Степен на распределба	Х			
Пропусност	✓	✓	✓	✓
Ефикасност на распределба	Х			
Ефикасност	✓	Х		
Севкупна ефикасност на опремата (OEE)	✓	✓	✓	✓
NEE Индекс	Х			
Расположливост	✓	✓	✓	✓
Ефективност	✓	✓	✓	✓
Стапка на квалитет	✓	✓	✓	✓
Степен на подготовка	Х			
Степен на шкарт	Х			
Степен на искористеност на машината	Х			
Процент на шкарт	✓	✓	✓	✓
Стапка на оптоварување на опремата	Х			
Стапка на доизработени парчиња	✓	Х		
Стапка на пад	Х			
Индекс за способност на машините	Х			
Парчиња кои поминале на прво без доработка (FPY)	✓	✓	✓	✓
Критична способност на машините	Х			
Индекс за способност на процесот (Cp)	✓	Х		
Еколошка компатибилност на показателите	Х			
Способност на критичен процес (Cpk)	✓	Х		
Емисиона стапка	Х			
Енергетска стапка	Х			
Стапка на искористеност на материјалот	Х			
Штетни супстанции	Х			
Опасен шкарт	Х			
Сеопфатна потрошувачка на енергија	✓	✓	✓	Х
Стапка на произведени добри парчиња	Х			
Стапка на интегрирани парчиња	Х			
Стапка на производни загуби	✓	Х		
Складишна и транспортна залиха	Х			
Стапка на останати загуби	Х			

Како што е и наведено во рамката, но и во литературата [239], [240], секое претпријатие може да ги прилагоди показателите кои ги следи со цел да го мери својот učinok. Табела 5.5 прикажува преглед на избраните показатели за мерење и анализа. Показателите за дигитална вредност се засноваат на показателите дефинирани во

Табела 5.4, при што од нив се изведени и дополнителни показатели применливи во Smart Learning Factory - Скопје. Показателите за дигитална култура и дигитален интензитет се целосно преземени и дефинирани врз основа на литературата.

Во изборот рамномерно се застапени показатели од литературата, показатели дефинирани со стандарди, како и нови показатели развиени за специфичните потреби на фабриката за учење. Табела 5.5 ја содржи конечната листа на показатели кои ќе се мерат и пресметуваат како примарни показатели. Дополнително, вклучени се и секундарни показатели кои служат како влезни големини за пресметка на примарните показатели. Показателите се хиерархиски организирани, при што секундарните показатели се означени со сиво.

Усвоените имиња и ознаки на показателите во Табела 5.5 ќе се користат понатаму низ текстот. Кај дел од показателите за дигитална вредност кои се преземени од стандарди, применети се изменети имиња со цел усогласување со терминологијата во литературата и воспоставените практики на Машински факултет - Скопје.

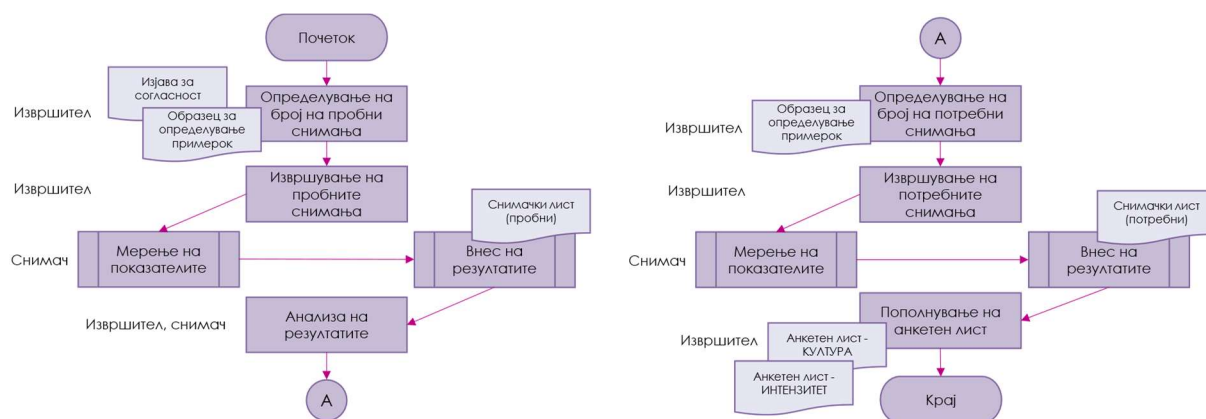
Табела 5.5 Конечна листа на показатели за мерење

Р.Б.	Име на показател	Ознака	ЕМ	Слој	Извор
1	Време на изработка · Средно време - Максимално време - Минимално време - Единечно време · Коефициент на проценка на залагање	ti	s	Процеси	Стандард
2	Време на додадена вредност · Единечно време на додадена вредност	tdv	s	Процеси	Стандард
3	Времетраење на застои	tz	s	Процеси	Стандард
4	Стапка на пропусност · Број на произведени делови · Време на изработка	TR	%	Процеси	Стандард
5	Стапка на време на додадена вредност · Време на додадена вредност · Време на изработка	DVR	%	Процеси	Изведен
6	Стапка на застој во вкупното време · Времетраење на застои · Време на изработка	ZR	%	Процеси	Изведен
7	Добри парчиња	GQ	#	Процеси	Стандард
8	Количина на шкрат	SQ	#	Процеси	Стандард
9	Стапка на квалитет · Добри парчиња · Произведена количина	QR	%	Процеси	Стандард
10	Број на грешки при изработка	GI	#	Процеси	Изведен
11	Цена на чинење на застојот · Времетраење на застои · Време на изработка · Цена на чинење на производот	Cs	ПЕ	Процеси	Изведен
12	Цена на чинење на шкартот · Шкарт производи · Цена на чинење на производот	Cz	ПЕ	Процеси	Изведен
13	Севкупна ефикасност работната сила · Достапност - Ефективно време на извршител - Времетраење на застој	OLE	%	Процеси	Литература

Р.Б.	Име на показател	Ознака	ЕМ	Слој	Извор
	· Перформанс · Теоретска количина на произведени делови · Произведени делови · Стапка на квалитет				
14	Индекс за флексибилност · Време на изработка · Дозволено Време на изработка · Такт	FI	-	Процеси	Литература
15	Ниво на прилагодливоста на промени	PP	-	Луѓе	Изведен
16	Ниво на проценет когнитивен напор	MN	-	Луѓе	Изведен
17	Ниво на проценет физички напор	FN	-	Луѓе	Изведен
18	Ниво на мотивација	PM	-	Луѓе	Изведен
19	Ниво на леснотија за користење на решенијата	UF	-	Луѓе	Изведен
20	Ново на вклученост во носење на одлуките	DM	-	Луѓе	Изведен
21	Стапка на дигитално потпомогнати задачи/активности · Број на дигитално потпомогнати задачи · Вкупен број на задачи	DZR	%	Технологији	Литература
22	Време на поврат на инвестицијата · Нето профит · Ефективен капацитет · Цена на чинење на производ · Инвестиција	ROI	месеци	Технологији	Литература
23	Дигитална зрелост	IMPULS	-	Стратегија	Литература

5.2.4. План за собирање на податоците

Начинот на спроведување на експериментот е дефиниран со дијаграмот на тек на Слика 5.10.



Слика 5.10 Начин на спроведување на експериментот

За време на снимањето, секогаш има по еден извршител кој е задолжен за извршување на сценариото, двајца снимачи и еден контролор на експериментот. Снимачите се исти во текот на сите сценарија и за сите извршители. Едниот снимач е задолжен за мерење на времињата со хронометар, додека другиот снимач е задолжен за мерењата кои вклучуваат броење на одредени појави во текот на експериментот (како на пример шкарт, грешки итн.). Контролорот е задолжен да го следи квалитетот на извршување на сценариото и снимањето на показателите. Контролорот исто така ги води сценаријата согласно редоследот, дава контекст на извршителот доколку е тоа потребно и треба да се осигура дека извршителот ги добива и соодветно ги пополнува влезните документи во чекорите (на пр. изјавата за согласност, анкетниот лист итн.)

Образецот за собирање на податоците дизајниран за ова истражување е даден Слика 5.11. Образецот се состои од три главни целини за полесно пополнување и анализа:

- **Време на производство** - овој дел е исклучително важен и затоа е издвоен како посебен во образецот, таму се внесуваат времињата на одделните чекори при монтажата на делот кој е избран за производство. Со цел да има статистичка релевантност на мерењата, се изведуваат пробни, а потоа и потребни снимања, во соодветен број. Овој дел од образецот е идентичен на образецот за снимање со хронометар.
- **Усвоени показатели** - во овој дел се листаат показателите кои од одредени причини, поради условите или поради недостаток на податоци е усвоени и како такви ќе се користат понатаму низ пресметките.
- **Измерени/пресметани показатели** - во овој дел се сместени показателите кои се мерат со помош на броење или забележување на соодветните појави (шкарт, грешки) или пак со пресметка која вклучува показатели од сите три дела на образецот.

Образецот е надополнет со колона за единица мерка во која е направено мерењето/пресметката, како и колона за забелешка која потенцијално треба да се земе предвид при обработката на податоците. Со боја истакнати се показателите кои се дел од примарните показатели кои подоцна ќе бидат дискутирани во Поглавје 5.4. Ваков образец се изработува за сите сценарија посебно, а подоцна при споредбената анализа ќе биде претставен образец со збирни резултати.

Бројот на пробни снимања е определен според [241]. Според равенката дадена во трудот, но и според претходни набљудувања и искуство на авторот, може да се потврди дека генерално процесите во фабриката за учење имаат мали варијации. Дополнително, експериментите се изведуваат во контролирана средина (Smart Learning Factory - Skorje), а целта на истражувањето е споредбена анализа помеѓу различни сценарија, а не прецизна индустриска сертификација. Имајќи ги предвид и ограничените ресурси, ниското ниво на ризик и стабилноста на процесот, усвоен е број на потребни снимања $n_{pilo\ n} = 5$.

За секој чекор во секое од сценаријата, определен е бројот на потребни снимања според Равенка 5.1.

$$n_{sn} = \left(\frac{Z \cdot \sigma_{sn}}{E} \right)^2 \quad (5.1)$$

Каде што:

- n_{sn} - потребна големина на примерок
- Z - доверливост, се усвојува $Z=1.96$ за 96% доверливост
- σ_{sn} - стандардна девијација
- E - дозволена грешка

Поради тоа што истражувањето располага со ограничен број на извршители, бројот на снимања по извршител се пресметува според Равенка 5.2.

$$n_{i_n} = \frac{n_{sn}}{n_{i_r}} \quad (5.2)$$

Каде што:

- n_{i_n} - број на снимања по извршител
- n_{i_r} - број на потребни снимања
- n_{s_n} - број на извршители на располагање за експериментот

Деталните пресметки за секое сценарио се дадени во Прилог 6 во соодветните обрасци за секое од сценаријата. Генерални формули и објаснувања на показателите дадени се во Поглавје 5.4.

БРОЈ И ИМЕ НА СЦЕНАРИО																					
ВРЕМЕ НА ПРОИЗВОДСТВО																					
		ПРОБНИ СНИМАЊА						ПОТРЕБНИ СНИМАЊА													
ЗАФАТИ		l	n	σ	n	\bar{x}	CV	l	n	σ	n	tmax	tmin	Σt	tsr	KPZ	tn	EM	ЗАБЕЛЕШКИ		
Подготвително-завршни зафати		1	1	0	0	1	0.0%	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	0	0	0.0	s			
Технолошки зафати		1	1	0	0	1	0.0%	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	0	0	0.0	s			
Дополнителни зафати		1	1	0	0	1	0.0%	0.0	0.0	0	0	0	0	0.0	0	0	0.0	s			
Коефициент на проценка на залагање (примерок)		KPZ_n	0	0				0	0									-			
Коефициент на проценка на залагање (сценарио)		KPZ_s															0.0	-			
Измерено стандардно време		ts_s															0.0	s			
Стандардно време		ts															0.0	s			
УСВОЕНИ ПОКАЗАТЕЛИ																					
ЗАБЕЛЕШКИ																					
Борј на сценарија		s	0.0	сценарија																	
Потребна количина		DQ	0.0	производи																	
Вкупно време на располагање во една смена		TAT	0.0	s																	
Планирано време на зафатеност		PBT	0.0	s																	
Време на зафатеност		BT	0.0	s																	
Време на извршување на работен налог		TPT	0.0	s																	
Цена на чинење на производ		CČ	0.0	ПЕ																	
Саатница на извршител		ONR	0.0	ПЕ																	
Површина на сценариото		A_s	0.0	m2																	
ИЗМЕРЕНИ/ПРЕСМЕТАНИ ПОКАЗАТЕЛИ																					
ЗАБЕЛЕШКИ																					
Произведена количина		PQ	0.0	производи																	
Време на додадена вредност (Value-added time)		tdv	0.0	s																	
Подготвително-завршно време		tpz	0.0	s																	
Дополнително време		td	0.0	s																	
Стапка на време на додадена вредност		RDV	0.0	-																	
Времетраење на застои		tz	0.0	s																	
Стапка на застој во вкупното време		ZR	0.0	%																	
Количина на шкарт		SQ	0.0	производи																	
Добри парчиња		GQ	0.0	производи																	
Стапка на квалитет		QE	0.0	%																	
Стапка на пропустност		TR	0.0	производи/мин																	
Број на грешки при изработка		GI	0.0	грешки																	
Стапка на грешки по производ		GIR	0.0	грешки/производ																	
Ефективно време на извршителот		WOT	0.0	s																	
Измерена продуктивност на извршителот		WP_s	0.0	%																	
Продуктивност на извршителот		W	0.0	%																	
Успешност при прв обид/Принос		FPY	0.0	%																	
Цена на чинење на шкарт		CS	0.0	ПЕ																	
Цена на чинење на застои		CZ	0.0	ПЕ																	
Цена на чинење на загубеното време на извршителот		CI	0.0	производи																	
Цена на чинење на изгубените шанси за производ при застој		CZP	0.0	ПЕ																	
Производи по метар квадратен		PQ_m	0.0	производи/m2																	
Индекс за флексибилност		FI	0.0	-																	
Севкупна ефективност на работната сила		OLE	0.0	%																	
Достапност		D	0.0	%																	
Перформанс		P	0.0	%																	
Теоретски произведена количина		PQ_t	0.0	производи																	

Слика 5.11 Образец за собирање на податоците при снимањата

Табела 5.6. План за собирање на податоците





Р.Б.	Показател	ЕМ	Тип на мерење	Тип на податоци	Метод	Локација	Прашање на кое одговара
1	Време на изработка	s	Излез	Континуирани	Хронометар	SLFS	Колку време е потребно за да се заврши една задача?
2	Време на додадена вредност	s	Излез	Континуирани	Хронометар	SLFS	Колку од вкупното време додава вредност?
3	Времетраење на застои	s	Излез	Континуирани	Хронометар	SLFS	Колку трае застојот?
4	Стапка на пропусност	%	Излез	Континуирани	Формула	SLFS	Колкав процент од производите поминуваат без дефекти?
5	Стапка на време на додадена вредност	%	Излез	Континуирани	Формула	SLFS	Колкав процент од вкупното време додава вредност?
6	Стапка на застој во вкупното време	%	Излез	Континуирани	Формула	SLFS	Колкав процент од вкупното време е застој?
7	Добри парчиња	#	Излез	Дискретни	Броење	SLFS	Колку парчиња го задоволуваат стандардот за квалитетот?
8	Количина на шкрат	#	Излез	Дискретни	Броење	SLFS	Колку парчиња не го задоволуваат стандардот за квалитет?
9	Стапка на квалитет	%	Излез	Континуирани	Формула	SLFS	Колкав процент производи го задоволуваат квалитетот?
10	Број на грешки при изработка	#	Излез	Дискретни	Броење	SLFS	Колку грешки се направени за време на процесот?
11	Цена на чинење на застојот	ПЕ	Излез	Континуирани	Формула	SLFS	Колку чини застојот?
12	Цена на чинење на шкратот	ПЕ	Излез	Континуирани	Формула	SLFS	Колку чинат шкрат производите?
13	Севкупна ефикасност работната сила	%	Излез	Континуирани	Формула	SLFS	Колкава е вкупната ефикасност на работната слика во контекст на достапност, перформанс и квалитет?
14	Индекс за флексибилност	-	Излез	Континуирани	Формула	SLFS	Колку измерената време отстапува од дозволеното време?
15	Ниво на прилагодливоста на промени	-	Излез	Ординални	Прашалник	Онлајн	Колкава е прилагодливоста на промените
16	Ниво на проценет когнитивен напор	-	Излез	Ординални	Прашалник	Онлајн	Колкав е проценетиот когнитивен напор?
17	Ниво на проценет физички напор	-	Излез	Ординални	Прашалник	Онлајн	Колкав е проценетиот физички напор?
18	Ниво на мотивација	-	Излез	Ординални	Прашалник	Онлајн	Колкаво е нивото на мотивација?
19	Ниво на леснотија за користење на решенијата	-	Излез	Ординални	Прашалник	Онлајн	Колкава е леснотијата на користење на дигиталните решенија?
20	Ново на вклученост во носење на одлуките	-	Излез	Ординални	Прашалник	Онлајн	Колку вработените се вклучени во донесување на одлуки?
21	Стапка на дигитално потпомогнати задачи/активности	%	Влез	Дискретни	Броење	SLFS	Колку чекори од процесот имаат дигитална карактеристика?
22	Време на поврат на инвестицијата	мес.	Излез	Континуирани	Формула	Пазар	За колку време ќе се врати инвестицијата?
23	Дигитална зрелост	-	Излез	Ординални	Прашалник	Онлајн	Колкав е индексот за дигитална зрелост на сценариото?

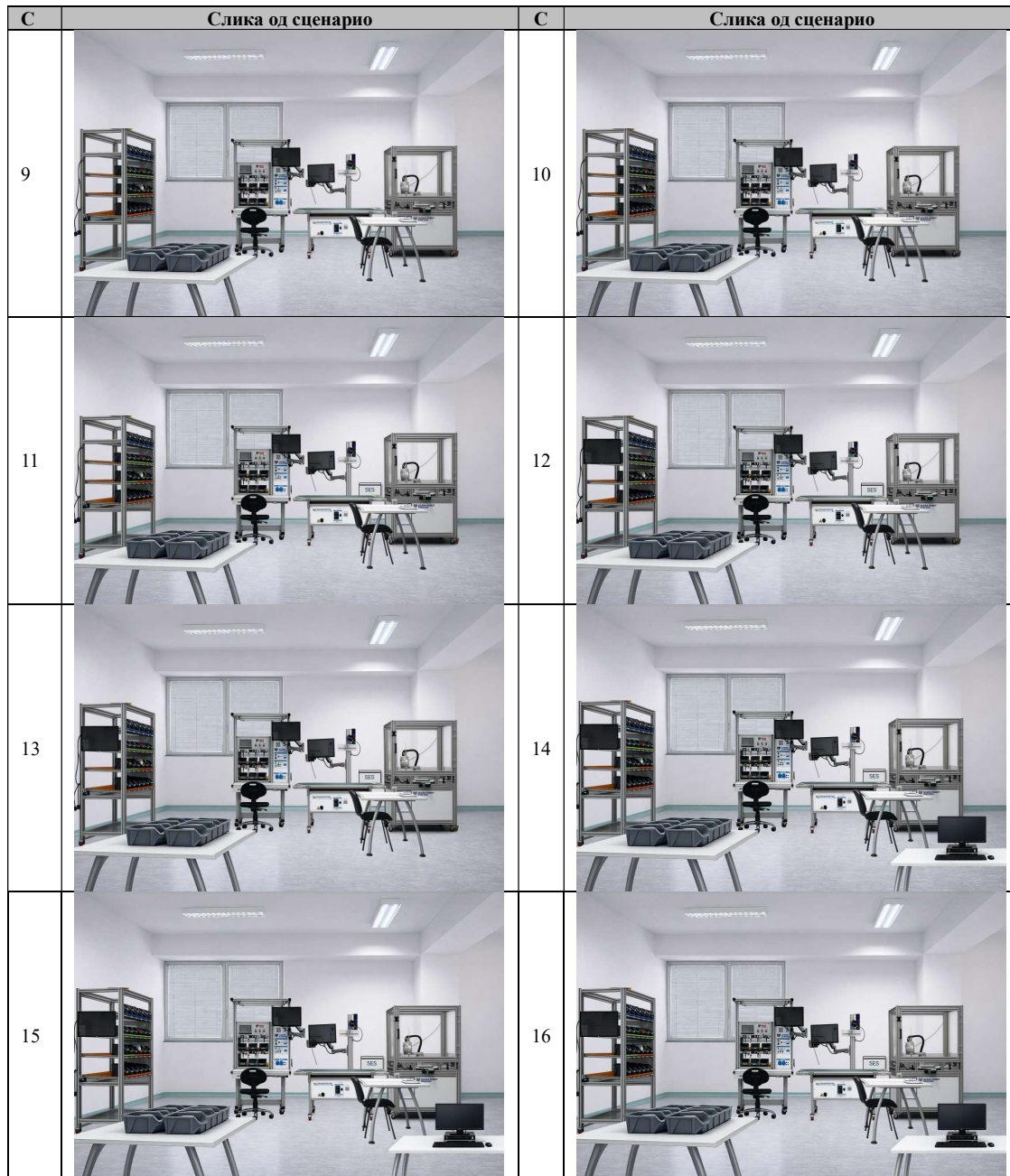
5.3. Резултати од експериментите

5.3.1. Изведување на експериментите

Во дефинираната околина (Smart Learning Factory - Skorje), објаснета во Поглавје 5.1., низ сценаријата дефинирани во Поглавје 5.2.2., измерени се показателите дефинирани во поглавјето 5.2.3. Поставувањето на сите сценарија, дефинирани во Прилог 5, преку реални слики дадено е во Табела 5.7. Во табелата е даден и краток опис за надградбата на секое од сценаријата во споредба со претходното.

Табела 5.7 Сценарија во SLFS

С	Слика од сценарио	С	Слика од сценарио
1		2	
3		4	
5		5	
7		8	



Спроведувањето на експериментот е прикажано на Слика 5.12.



Слика 5.12 Спроведување на експериментите

Пред започнување на експерименталната постапка, со цел да се обезбеди стандардизиран пристап и конзистентност во спроведувањето на мерењата, на секој извршител му се доставуваат релевантни документи согласно истражувачката процедура прикажана на Слика 5.12. Мерењата ги спроведуваат снимачи, кои користат таблет за евидентирање на потребните показатели, како и дигитален образец за внесување на измерените вредности и дополнителни забелешки од набљудувањето.

Во продолжение се прикажуваат резултатите од анализата на влијанието на промената на сценаријата врз избраните показатели. Резултатите се структурирани по сценарија, при што за секое сценарио е извршена посебна анализа и интерпретација на добиените вредности во контекст на воведените дигитални интервенции. Оваа анализа има за цел да го прикаже директното влијание на различните нивоа и типови на дигитална поддршка врз перформансите на процесот.

Подетална дискусија за взаемните релации помеѓу показателите, како и нивната улога при донесување идни одлуки за понатамошна дигитализација и оптимизација на процесите, ќе се разгледа во следното поглавје 5.5. Останати анализи на резултатите. Овие релации не се задолжително директно поврзани со влијанието на дигиталната трансформација, туку претставуваат аналитичка основа за поддршка на идни менаџерски и развојни одлуки.

5.3.2. Показатели за дигитална вредност

Во продолжение прикажани се резултатите од поединечните мерења на секој од показателите. Главно во делот на дигитална вредност, со цел да се дојде до одреден показател, во текот на мерењата, повеќе различни показатели се мерени, а оваа хиерархија е дадена во Табела 5.5. Во продолжение ќе бидат презентирани резултати само за примарните показатели, а по потреба и за некои од секундарните, доколку промената на примарните не е линеарна со промената на секундарните показатели. Пред да се премине кон резултатите, за да има релевантна анализа многу е важно да се напоменат неколку ограничувања при анализата и споредбата помеѓу сценаријата. Сценаријата ќе бидат споредувани согласно графичкиот приказ на Слика 5.13.

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
Рачно производство	Базично Lean производство	Smart Paka Yoke монтажа	Pick To Light монтажа	Монтажа со Аугментирана реалност	Автоматизиран транспорт	Автоматизирана контрола на квалитет	Автоматизирано следење	Напредно ниво на визуелен менаџмент	Сензори за безбедност	Систем за енергетски менаџмент	Систем за менаџмент на одржување	Апликација за root cause анализа	ERP систем за планирање и управување	Апликација за 5S аудит	AI VAS за 5S аудит
Базични сценарија		Асистенти за монтажа			Дигитализирани процеси			Апликации за производство							

Слика 5.13 Преглед на сценарија и типот на сценарија

Сценаријата се поделени на четири групи:

- Базични сценарија (C1 - C2)
- Асистенти за монтажа (C3 - C5)

- Дигитализирани процеси (С6 - С8)
- Апликации за производство (С9 - С16)

Боите означуваат групи на споредување на сценаријата т.е. Асистентите за монтажа, покрај меѓусебно, се споредуваат и со базичните сценарија, додека Дигитализираните процеси се споредуваат со барем еден од асистентите за монтажа (во случајов се избира С8 како карактеристично сценарио без апликации за производство) и со базичните сценарија.

При споредба на показателите за дигитална вредност, важно е да се земе предвид дека не сите сценарија влијаат на процесот на ист начин. Некои дигитални решенија директно го менуваат начинот на извршување на работните чекори и затоа имаат јасно и мерливо влијание врз перформансите. Други, пак, имаат индиректна улога - тие го поддржуваат извршителот, ја подобруваат организацијата или обезбедуваат информации, но не ја менуваат суштината на процесот на додавање на вредност (С9 - С16).

Ако сите сценарија се споредуваат заедно, без да се направи разлика помеѓу овие типови на влијание, може да се добијат погрешни или нереални заклучоци. Кај апликациите за производство, малите и случајни отстапувања во процесот (на пример, поради замор или моментна невнимателност) можат да имаат поголемо влијание врз резултатите отколку самата технологија. Во таков случај, сценарио што е технолошки понапредно може да изгледа како полошо, иако во реалноста е воведено како подобрување.

Поради тоа, сценаријата ќе се споредуваат само во рамки на групи со сличен начин на влијание, каде што резултатите навистина ја одразуваат улогата на дигиталната технологија. Оваков пристап се минимизира влијанието на случајни варијации врз ефектите од технологијата, овозможувајќи (по)објективна анализа.

За разлика од дигиталната вредност, кај дигиталната култура и дигиталниот интензитет сите сценарија може да се споредуваат меѓусебно. Овие показатели не зависат директно од промените во поединечните чекори на процесот, туку ја опишуваат општата состојба и нивото на дигитална зрелост во начинот на работа. Дигиталната култура и интензитетот го одразуваат степенот на користење и прифаќање на дигиталните технологии, како и нивната застапеност во процесот, без разлика дали тие имаат директно или индиректно влијание врз оперативните перформанси. Поради тоа, ефектот од воведување на повеќе различни технологии може да се следи и споредува низ сите сценарија. **Со ваквиот пристап се овозможува да се согледа кумулативното влијание од постепеното имплементирање на нови дигитални решенија во еден ист процес, што е клучно за разбирање на развојот на дигиталната култура и зголемувањето на дигиталниот интензитет со текот на времето. Секој показател понатаму ќе биде презентираан преку:**

- генерална дефиниција според стандард и/или литература,
- дефинирање и примена на показателот во контекст на истражувањето,
- начин на пресметка во истражувањето,
- резултати од истражувањето за показателот
- кратка дискусија за резултатите
- ограничувања и други напомени

5.3.2.1. Време

Првата подгрупа на показатели за дигитална вредност се показателите за време. Според анализата во Поглавје 5.2.3, избрани показатели од оваа подгрупа се:

- ДВ_1 - Време на изработка
- ДВ_2 - Време на додадена вредност
- ДВ_3 - Време на застој

ДВ_1 - Време на изработка

Времето на изработка (t_i) е просечно време потребно за извршување на определена задача или операција. Во стандардот овој показател е именуван како време на извршување/изработка (Execution time - ТРТ), додека во други контексти истиот показател (мерен на идентичен начин) може да се сретне како временска норма. Сепак, терминологијата избрана за овој индикатор во дисертацијата не се однесува на временска норма во нејзиното класично значење. Временската норма, како поим, подразбира пропишано време за извршување на одредена задача и најчесто се користи во контекст на нормирање и планирање на работата. Во рамки на ова истражување, пресметано е реалното време потребно за извршување на задачите, добиено врз основа на експериментални мерења. Целта на мерењето не е воспоставување на норматив или стандард за мерење на работата, туку споредбена анализа на реалното времетраење на задачите низ различни производствени сценарија, независно од тоа дали тие биле претходно нормирани или ќе бидат предмет на идно нормирање.

Времето на изработка се применува за споредбена анализа на различни производни сценарија со цел да се утврдат разликите во времетраењето на извршување на истите задачи. Преку оваа споредба се оценува ефектот од воведените промени, како што се различни технологии, дигитални решенија или начини на организација на работата, при што промените во времето директно го одразуваат нивното влијание врз ефикасноста на процесот. Добиените резултати претставуваат објективна основа за поддршка при донесување одлуки за избор на најсоодветно производно сценарио, како и за насочување на идни подобрувања. Истовремено, измерените стандардни времиња служат како основа за понатамошни анализи, поврзување со други показатели и развој на дополнителни модели и истражувања насочени кон унапредување на процесите

Времето на изработка, за i -тото сценарио од експериментот, може да се подели на три дел: подготвително-завршно време (tpz), технолошко време (t_t) и дополнително време (td) (Равенка 5.3.)

$$t_i = tpz_i + tt_i + td_i \quad (5.3)$$

Во овој труд, времето на изработка е добиено како збир од единечните времиња потребни за изведување на секоја операција за производство на избраниот производ (Равенка 5.4.). Анализата подоцна се фокусира на технолошкото време, како време кое додава вредност, а обрасците со собрани податоци за секое сценарио со различни бои ги разликуваат трите типови на времиња (Прилог 6).

$$t_i = \sum te_i \quad (5.4)$$

Единечното време te е времето потребно за реализација на една операција. Операциите се стандардизирани преку упатството за производство на производот дадено во Прилог 4. Со цел да се добие статистички релевантен резултат, секој чекор е

повторен n пати, а единечното време за j -тата операција од упатството е пресметано според Равенката 5.5.

$$te_{i,j} = tsr_{i,j} \cdot Kpz_{i,j} \quad (5.5)$$

Просечното време на исполнување на j -тата операција на i -тото сценарио се пресметува како:

$$tsr_{i,j} = \frac{tmax_j - tmin_j}{\sum te_j} \quad (5.6)$$

$$te_j = \sum te_{j,n} \quad (5.7)$$

Бројот на повторувања на снимањата n се пресметува за секоја операција одделно, според равенката:

$$n = \left(\frac{Z \cdot \sigma}{E} \right)^2 \quad (5.8)$$

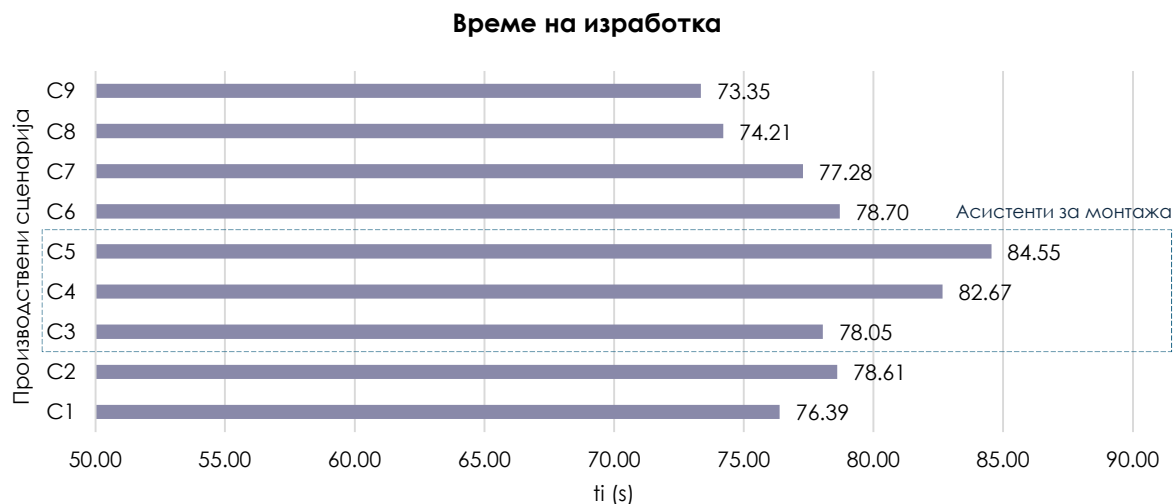
Каде што:

- ts_i - Време на изработка на i -тото сценарио
- te_i - единечни времиња на операциите од i -тото сценарио
- te_j - единечно време на j -тата операција на i -тото сценарио
- $i \in \{1, \dots, 15\}$ - број на сценарио во експериментот
- $j \in \{1, \dots, 22\}$ - број на операција во сценариото
- $n \in \left\{ 1, \dots, n = \left(\frac{Z \cdot \sigma}{E} \right)^2 \right\}$ - број на потребни снимања (повторувања)
 - Z - ниво на доверба, усвоено $Z = 96\%$
 - σ - стандардна девијација на потребните снимања
 - n_p - број на пробни снимања, усвоено $n_p = 5$ (Rule of Thumb)
 - E - дозволена апсолутна грешка, усвоено $E = 0.2$

На



Слика 5.14 прикажан е дијаграмот на промената на Времето на изработка низ производствените сценарија. Ова време не се менува од C10 до C16 бидејќи системите имплементирани во овие сценарија индиректно влијаат на целокупниот производствен процес, ефект кој во лабораториска околина тешко може да е прикаже.



Слика 5.14 Време на изработка по производствено сценарио

Иако сценаријата се дизајнирани да секоје следно сценарио биде технолошки понапредно, сепак на првиот дијаграм се забележува дека промената на Времето на изработка низ сценаријата не е линеарна со секоје наредно сценарио, спротивно од очекувањето. Најмало Време на изработка се забележува при технолошки нај напредното сценарио C8 (Автоматизирано палетизирање), сепак може да се забележи дека C1 (Рачно производство) има помало Време на изработка отколку сценаријата кои вклучуваат дигитални асистенти за монтажа (C3, C4 и C5), истакнати со испрекината линија на дијаграмот. Доколку ги споредуваме само асистентите за монтажа, забележуваме значителни разлики помеѓу времињата. Постојат повеќе објаснувања зошто ова се случува, а како прво е тоа што сите од нив имаат дополнителни чекори согласно потребите на дигиталните системи:

- C3 Smart Poka Yoке монтажа - системот бара секој следен чекор да биде регистриран од страна на извршителот со цел истиот да ја продолжи секвенцата за монтажа,
- C4 Pick to Light монтажа - системот работи со двојна верификација дека е земено парче, регистрација на движење на раката на извршителот и намалување на тежината во кутијата од која се зема парче што одзема одредено време,
- C5 Монтажа со аугментирана реалност - во ова сценарио извршителот треба да притиска „следен чекор“ на упатството со аугментирана реалност, што е дополнително движење за извршителот кое одзема и дополнително време.

Кај сценаријата од C10 до C15, показателот време на изработка не покажува разлики помеѓу мерењата и затоа не е прикажан на дијаграмот. За ваков тип на дигитални апликации, чувствителноста на овој показател тешко се детектира во лабораториски услови, бидејќи нивниот ефект не се манифестира преку директни и краткорочни промени во времето на изработка. Наместо тоа, нивното влијание е поизразено при подолг период на користење и се одразува првенствено преку показателите за дигитална култура и дигитален интензитет.

Ограничување кај овој показател е тоа што самостојното мерење на времето на изработка не секогаш овозможува целосно релевантна споредба помеѓу сценаријата, бидејќи тие можат суштински да се разликуваат по својот карактер и услови на изведба. Исто така, дигиталните решенија во сценаријата се сепак карактеристични за Smart

Learning Factory - Skorje, а од истите во реалноста постојат голем број на варијанти и нивоа на оптимизираниот. Затоа, резултатите добиени од овој показател при ова истражување треба пред сè да се анализираат во контекст на SLFS и да се комбинираат со други показатели (на пример Стапка на квалитет), при што споредбата треба да се базира на повеќекритериумски пристап, а не исклучиво на временскиот аспект.

Дали едно време на изработка е „подобро“ или „полошо“ тешко може да се определи само врз основа на неговата апсолутна вредност по сценарио. Поради тоа, во анализата се воведува бројот на произведени делови. На овој начин се добива појасна слика за ефикасноста на сценаријата, бидејќи времето се анализира во контекст на остварениот производствен резултат, а не како изолиран показател. На ваков начин, од Времето на изработка се изведува показателот Стапка на пропусност (TR).

Овие ограничувања се од општ карактер и во голема мерка се применливи за повеќето од презентираниите дијаграми, бидејќи поединечните показатели не секогаш можат целосно да го опфатат комплексниот карактер и различните цели на анализираните сценарија. Целта на Поглавјето 5.4 е да ги презентира показателите и целосните резултати по сценарио за сите сценарија односно показатели, а анализите ќе бидат направени исклучиво во контекст на SLFS.

ДВ_2 - Време на додадена вредност

Времето на додадена вредност (tdv) е времето на операциите кои директно придонесуваат до обликување на избраниот производ (додаваат вредност). Во стандардот, овој показател е именуван како “Main Usage Time”. Во контекст на ова истражување, посоодветно е да се користи терминот време на додадена вредност, бидејќи анализата не е ограничена на машински операции, туку опфаќа целосни активности во кои учествуваат човекот и дигиталните системи.

Главната примена на овој показател е во тоа што истиот дава јасна и објективна основа за проценка на реалниот придонес на дигиталните решенија во секое од сценаријата кон вредноста која претпријатието ја испорачува кон клиентот т.е. времетраењето на активностите кои создаваат вредност за клиентите. Времето на додадена вредност се пресметува според равенката:

$$tdv_i = \sum_{j=1}^n tedv_{ij} \quad (5.9)$$

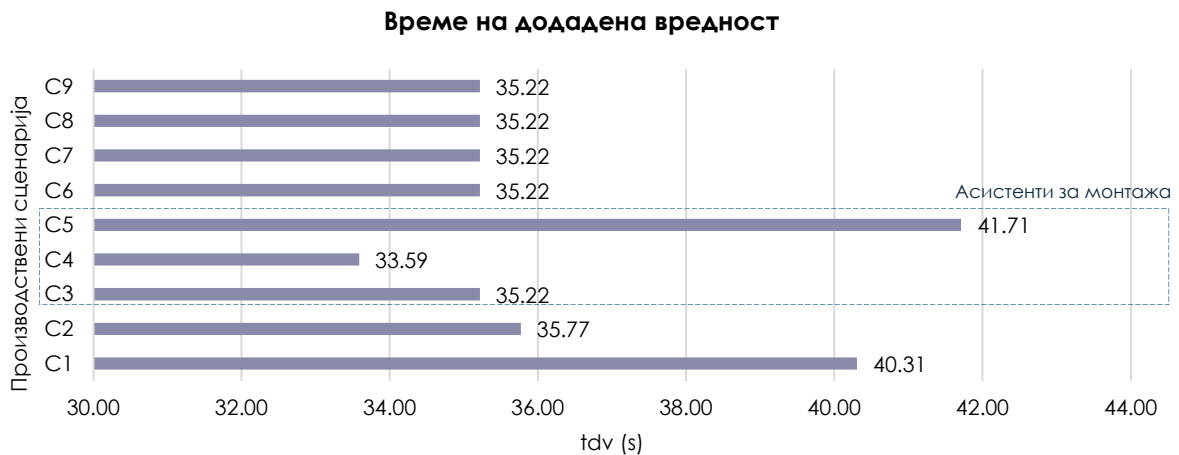
Каде што:

- tdv_i - време на додадена вредност на i -тото сценарио
- $tedv_{ij}$ - единечно време на додадена вредност на j -тата операција од i -тото сценарио

Методот на добивање е ист како и за времето на изработка, бидејќи ова време е издвоен дел од времето на изработка. Активностите кои додаваат вредност се издвоени со различна боја во образецот за собирање на податоци во Прилог 6. Во контекст на Равенката 5.1, тука важи:

$$tdv_i = tt_i \quad (5.10)$$

На Слика 5.15 прикажан е дијаграмот на промената на времето на додадена вредност низ производствените сценарија.



Слика 5.15. Време на додадена вредност по производствено сценарио

Дијаграмот покажува дека времето на додадена вредност значително варира кај почетните сценарија, со највисоки вредности кај C1 и C5.

Идентични ограничувања важат и кај овој показател како и кај времето на изработка. Анализата заснована на вакви споредбени резултати има ограничувања и не дозволува еднозначни заклучоци за „подобро“ или „полошо“ врз основа на апсолутната вредност на времето на додадена вредност. Поради ова се изведува показателот Стапка на време на додадена вредност во вкупното време на производството (DVR).

ДВ_2.1 - Стапка на време на додадена вредност во вкупното време на производство

Стапка на време со додадена вредност во вкупното време на производство (RDV) го изразува уделот на времето на додадена вредност (tdv) во однос на времето на изработка за производство (t_i) во даденото сценарио. Таа претставува директна мерка за тоа колку ефикасно производствениот систем го користи расположливото време за активности што директно придонесуваат за создавање вредност за клиентот. Стапката ја опишува структурата на процесното време, односно односот помеѓу активности кои додаваат и не додаваат вредност.

Стапката на време со додадена вредност се пресметува затоа што го нормализира апсолутното време и овозможува споредба помеѓу различни сценарија, процеси или временски опсези. Додека апсолутното време на додадена вредност ја покажува количината на корисна работа, стапката јасно го прикажува нејзиниот удел во вкупното време, независно од должината на процесот. Равенката за пресметка е:

$$RDV_i = \frac{tdv_i}{t_i} \quad (5.11)$$

Каде што:

- RDV_i - Стапка на време на додадена вредност за i -тото сценарио
- tdv_i - време на додадена вредност за i -тото сценарио
- t_i - Време на изработка за i -тото сценарио

Дијаграмот на слика Слика 5.34 ја прикажува распределбата на времето со додадена вредност (ДВ) и останатите времиња согласно Равенка 5.3. Се забележува дека во

поголемиот дел од сценаријата, иако со мала разлика, доминираат времињата кои не додаваат вредност што е и најчест случај во производствените процеси. Највисока стапка на време на додадена вредност во вкупното време се забележува кај базичното сценарио што се должи и на едноставниот процес на подготовка (а со тоа подготвително-завршните активност се пократки, што се одразува со поголема стапка на технолошкото време).

Овој дијаграм покажува дека апсолутното време со додадена вредност варира помеѓу сценаријата и не ја следи секогаш истата логика како релативниот удел. Иако кај повеќето сценарија стапката на додадена вредност е околу 50%, апсолутното време на додадена вредност се стабилизира во сценаријата во кои нема промена на асистентот за монтажа. Ова укажува дека подобрувањата во подоцнежните сценарија се постигнати главно преку скратување на вкупното процесно време, а не преку значително зголемување на времето со додадена вредност.



Слика 5.16 Стапка на време на додадена вредност во вкупното производствено по производствено сценарио

ДВ_3 - Времетраење на застои

Времетраењето на застои (tz) го мери кумулативното времетраење во кое производствениот процес е запрен поради различни причини, како што се технички дефекти, чекање, прилагодувања или други настани кои не се претходно предвидени. Вредноста на овој показател се изразува во секунди и ги опфаќа сите регистрирани прекини во текот на извршувањето на задачите во рамки на едно производствено сценарио.

Пресметката на времето на застој се врши на ниво на сценарио, при што кумулативното време се добива како збир од сите поединечни времиња на застој регистрирани кај одделните операции. Формално, времето на застој за i -тото сценариото

се определува како сума од поединечните застои поврзани со секоја операција во рамки на сценариото. Пресметката на времето на застој може да се претстави како:

$$tz_i = \sum_{j=1}^m tz_{i,j} \quad (5.12)$$

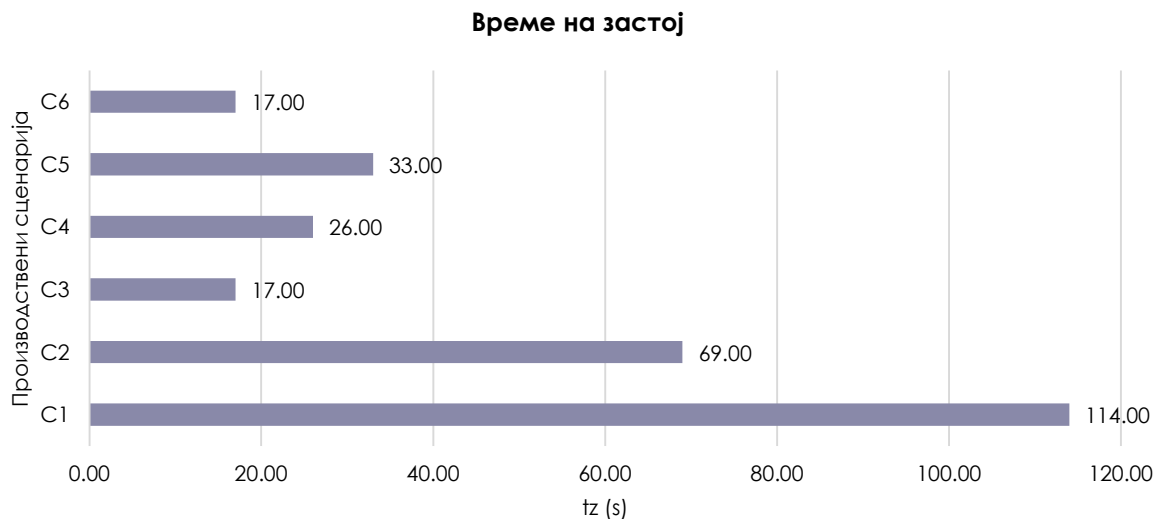
Каде што:

- $tz_{i,j}$ -застој поврзан со j -тата операција во i -тото сценарио
- m - број на операции (чекори) во сценариото

Теоретски, доменот на времето на застој е:

$$tz_i \in [0, \infty) \quad (5.13)$$

На Слика 5.17 прикажан е дијаграмот на времето на кумулативен застој низ производствените сценарија.



Слика 5.17 Време на кумулативен застој по производствено сценарио

Дијаграмот покажува значително намалување на времето на застој кај понапредните сценарија, при што од C7 па натаму вредностите се ниски и стабилни. Ова укажува дека воведените промени придонесуваат кон елиминација на чекања и прекини и обезбедуваат поконзистентен тек на процесот.

Показателот е од периодичен тип т.е. се мери тогаш кога реално ќе се појави за време на снимањето. Во дадениот контекст, време на застој овозможува квантитативна проценка на вкупното времетраење на застојот за секое производствено сценарио. Иако самиот показател не дава детални информации за причините за застојот, подлабока анализа на снимачките листови (дадени во прилог) овозможува идентификување на конкретните операции и чекори кои придонесуваат за најголем дел од застојот. На тој начин, показателот служи како почетна основа за насочена анализа и дефинирање на приоритетни чекори/операции за подобрување на процесот.

Како и кај претходните два показатели, и тука важат наведените ограничувања на анализата. Иако секогаш јасно е дека идеална состојба е застојот да биде нула или што е можно помал, во контекст на споредба на различните сценарија, неговата информативна вредност е ограничена. Причината е што и овој показател има релативен карактер, при

што неговото значење произлегува од неговиот однос, односно удел во вкупното време на процесот, а не од самата апсолутна вредност.

Иако Времето на изработка, времето на додадена вредност и времето на застој обезбедуваат директна информација за апсолутното времетраење на процесот, тие сами по себе не се доволни за целосна споредбена анализа помеѓу различни производствени сценарија. Затоа, во анализата дополнително се користат стапки како релативни показатели, кои го нормализираат времето и овозможуваат споредливост независно од вкупното траење или комплексноста на сценаријата. Од презентираниите показатели, преку пресметка се добиени уште неколку показатели поврзани со времето, и тоа:

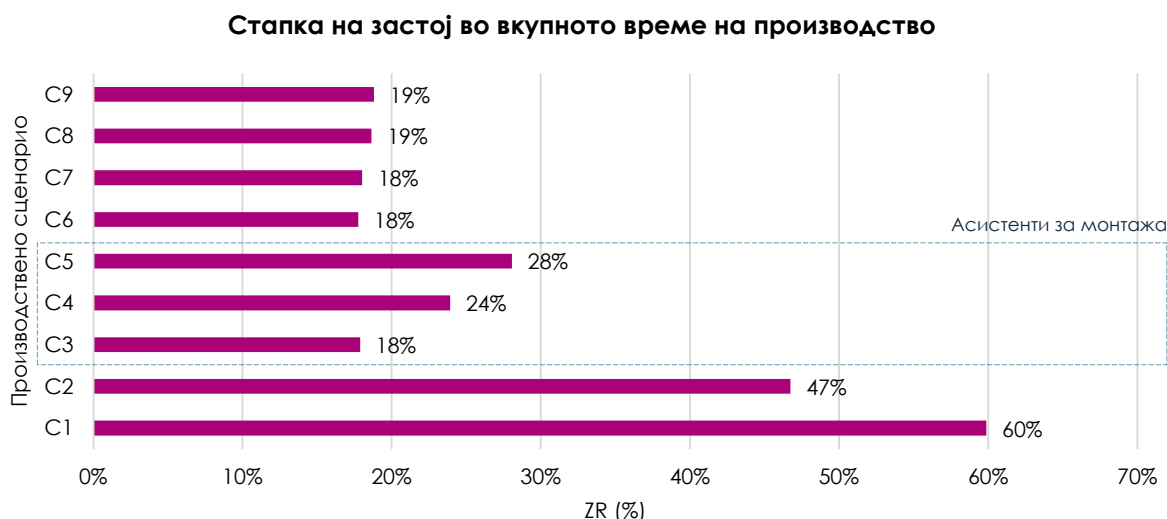
- ДВ_1.1 - Стапка на пропусност
- ДВ_2.1 - Стапка на време на додадена вредност во вкупното време на производство
- ДВ_3.1 - Стапка на застој во вкупното време на производство

ДВ_3.1 - Стапка на застој во вкупното време на производство

Стапка на застој (ZR) го изразува уделот на времето на застој $t_{z,i}$ во однос на вкупното релевантно време, составено од време на застој и време на нормална работа $t_{n,i}$. Според равенката $ZR = \frac{t_{z,i}}{t_{z,i} + t_{n,i}}$, показателот покажува колкав дел од расположливото време процесот не создава вредност поради прекини или застои, при што пониска вредност на ZR укажува на поефикасно и постабилно функционирање на системот.

На Слика 5.18 прикажан е дијаграмот на стапката на застој низ производствените сценарија. Овој индикатор изведен од индикаторот ДВ_3 - Време на застој. Показателот за секое одделно сценарио е пресметан според равенката:

$$ZR = \frac{t_{z,i}}{t_{z,i} + t_{n,i}} \quad (5.14)$$



Слика 5.18 Стапка на време на застој по производствено сценарио

Дијаграмот покажува изразено намалување на стапката на застој во однос на базичното сценарио C1 (Рачно производство). Голема промена се гледа при преминот од C2 кон C3 каде за прв пат се воведува асистент при монтажа.

Доколку обележаните сценарија со испрекинатата линија во дијаграмот С3, С4 и С5 (асистенти за монтажа) се споредат самостојно може да се забележи дека стапката на застој е доста поголема во кај аугментираната реалност наспроти Smart Poka Yoke станицата. Pick to Light решеното покажува среден резултат.

Кај сценаријата за дигитализација на процеси, се гледа мало зголемување на стапката при С8 (Автоматизирано палетизирање), што се должи на пократкото Време на изработка, наспроти застојот кој е генерално константен после монтажа.

ДВ_1.1 - Стапка на пропусност

Стапка на пропусност (TR) ја изразува количината на произведени производи по единица време. Таа е директна мерка за тоа колку ефикасно производствениот систем го претвора вложеното време во готови производи. Пропусноста го опишува обемот на производство, односно количината производи што системот може да ги произведе за определена единица време, и на тој начин претставува значаен индикатор за ефикасноста во производството. Во практиката, оваа стапка често се нормализира како производствена стапка (Production rate - PR), односно просечниот број производи произведени по единица време. Поради присуството на случајности во производството, како дефекти на машини, варијации во времињата на обработка и ограничувања на бафери, бројот на произведени делови е случајна променлива. Неговата очекувана вредност, т.е. пропусност, служи како репрезентативна мерка за капацитетот и реалниот производствен волумен на системот [242].

Овој показател е изведен од индикаторот ДВ_1 - Време на изработка, а се пресметува според следната равенка:

$$TR_i = \frac{PQ_i}{ti \cdot PQ_i} = \frac{1}{ti} \quad (5.15)$$

Каде што:

- TR_i - пропусност за i -тото сценарио
- PQ_i - број на произведени производи во i -тото сценарио
- ti - Време на изработка на i -тото сценарио

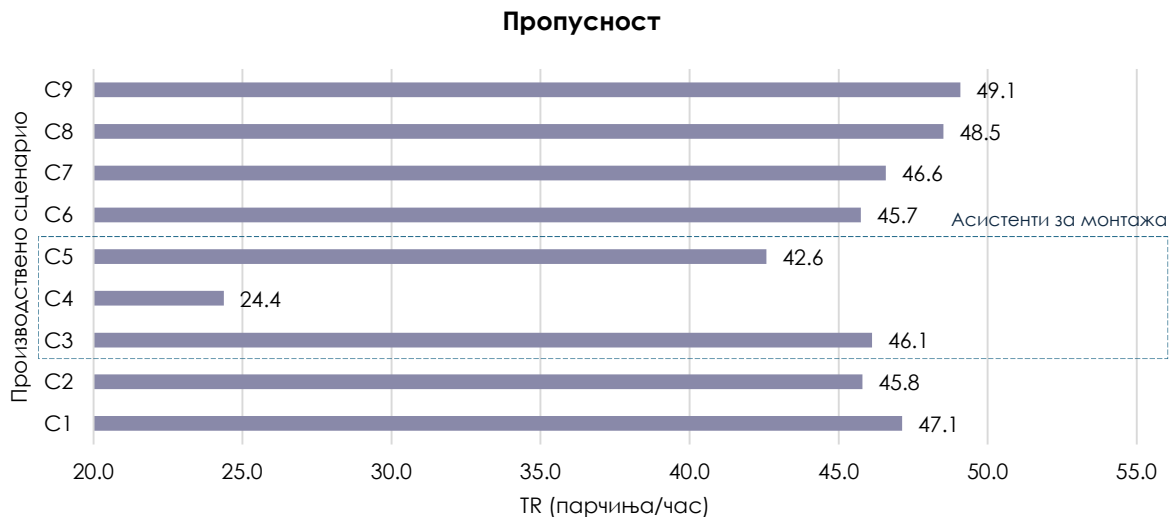
Во експериментот, за бројот на произведени производи во одреденото сценарио важи:

$$PQ_i = n_i \quad (5.16)$$

Каде што:

- n_i - е бројот на потребни снимања на i -тото сценарио.

На Слика 5.19 прикажан е дијаграмот на стапката на пропусност низ производствените сценарија.



Слика 5.19 Пропусност по производствено сценарио

Во однос на пропусноста (парчиња/час), истата логично ја следи промената на времето на изработка, што може да се види и од формулата. Овој показател е важен затоа што директно ја поврзува брзината на процесот со реалниот производствен капацитет и може да се користи за планирање на производството, споредба/пресметка на капацитетите помеѓу производни погони или линии (во случајов сценаријата) итн. Пропусноста пресметана преку времето на изработка може да биде и стратешки показател за пресметка на повратот на инвестиција согласно проектираниот капацитет. Секако доколку континуирано се следи пропусноста со реалните времиња (не времето на изработка) може да биде и показател за постоење на загуби во процесот.

5.3.2.2. Квалитет

Втората подгрупа на показатели за дигитална вредност се показателите за квалитет, главно поврзани со квалитетот на производот:

- ДВ_4 - Добри парчиња
- ДВ_5 - Количина на шкарт
- ДВ_6 - Стапка на квалитет
- ДВ_7 - Број на грешки при изработка

ДВ_4 и ДВ_5 - Добри парчиња и количина на шкарт

Показателите за квалитет т.е. Добри парчиња и Количина на шкарт се показатели кои се превеземени од стандардот ISO22400-2, а истите се клучни показатели при понатамошни пресметки, посебно во делот на квалитет и трошоци.

Во стандардот најпрво се започнува од показателот произведена количина (PQ) пресметана според следната равенка:

$$PQ_i = GQ_i + SQ_i = \sum_{k=1}^n gq_{k,i} + \sum_{k=1}^n sq_{k,i} \quad (5.17)$$

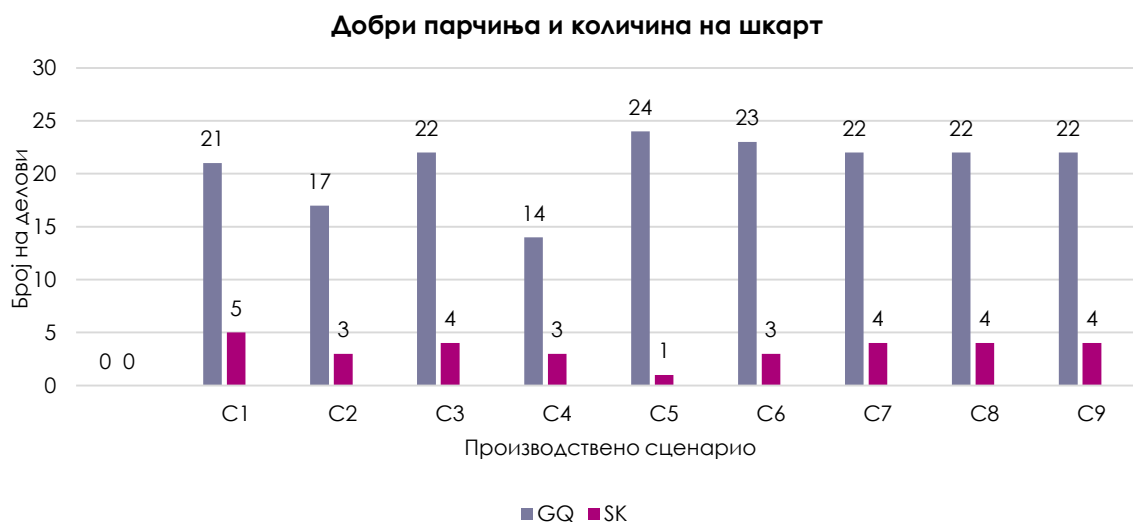
Како што е и претходно напоменато, за да се поедностави мерењето, во сите сценарија важи:

$$PQ_i = n_i \quad (5.18)$$

Каде што:

- PQ_i - произведена количина за i -тото сценарио
- GQ_i - вкупно индивидуални делови кои ги задоволуваат барањата за квалитет во i -тото сценарио
- SK_i - вкупно индивидуални делови кои не ги задоволуваат барањата за квалитет во i -тото сценарио
- n_i - број на потребни снимања во i -тото сценарио

Дијаграмот на Слика 5.20 го прикажува односот помеѓу бројот на добри парчиња и количината на шкарт по сценарио. Најдобри резултати се забележуваат во C5 (најмногу добри парчиња - најмалку шкарт), додека во останатите сценарија количината на шкарт е релативно стабилна, со мали варијации.



Слика 5.20 Добри парчиња и количина на шкарт по сценарио

ДВ_6 - Стапка на квалитет

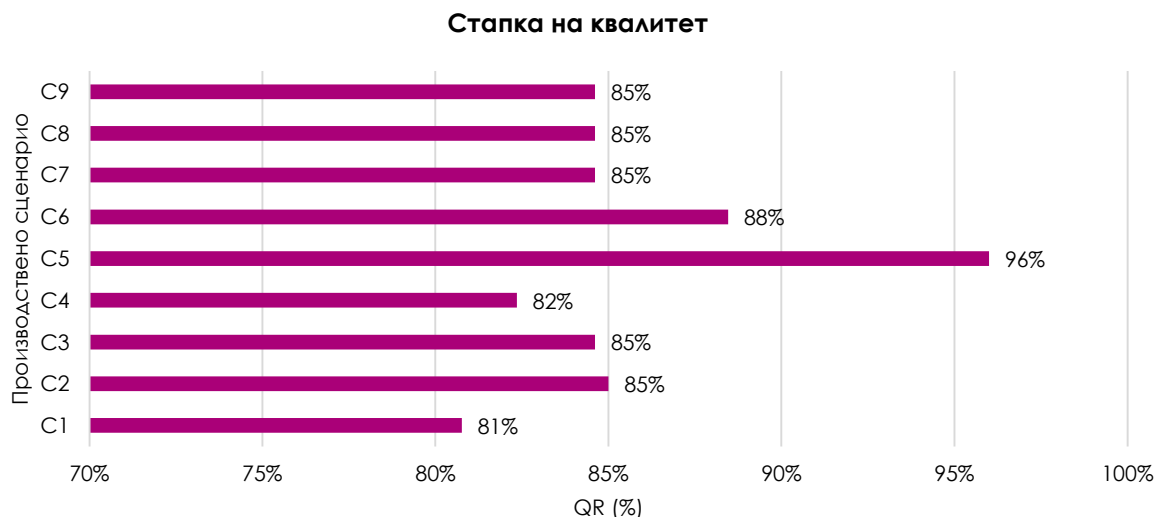
Согласно стандардот, стапката на квалитет (QR) се пресметува според Равенката 5.19. Стапката на квалитет претставува показател кој го изразува процентот на исправни производи во однос на вкупното производство.

$$QR_i = \frac{GQ_i}{PQ_i} \quad (5.19)$$

Каде што:

- QR_i - стапка на квалитет на i -тото сценарио
- GQ_i - добри парчиња во i -тото сценарио
- PQ_i - произведена количина во i -тото сценарио

Стапката на квалитет низ сите сценарија, прикажана е на Слика 5.21.



Слика 5.21 Стапка на квалитет

Стапката на квалитет ја мери ефикасноста на производниот процес од аспект на шкарт односно производи кои отстапуваат од спецификациите. Стапката на квалитет ја изразува успешноста на производниот процес во однос на создавање исправни производи и се движи во следниот опсег:

$$QR_i \in [0\%, 100\%] \quad (5.20)$$

Трендот на овој показател е јасен и интуитивен - колку е повисока стапката на квалитет, толку е процесот постабилен, поефикасен и со помалку грешки, шкарт и потреба од повторна обработка.

Стапката на квалитет се користи како практичен показател за следење на стабилноста и способноста на производниот процес, овозможувајќи навремена идентификација на проблеми поврзани со грешки, шкарт и потреба од повторна обработка. Во конкретниов случај, истата се разгледува од аспект на шкарт, додека квалитетот од аспект на грешки ќе биде измерен со показателот за број на грешки при изработка.

Показателот First Pass Yield (FPY), односно Принос, кој е дел од стандардот, нема да биде разгледуван во ова истражување поради тоа што под условите под кои се изведува истражувањето, важи:

$$FPY_i = QR_i \quad (5.21)$$

ДВ_7 - Број на грешки при изработката

Бројот на грешки при изработката (GI) е дефиниран како вкупен број на регистрирани отстапувања од стандардното упатство за работа, дадено во Прилог 4, направени од извршителот при изведба на производниот процес. Грешките се евидентираат преку Методот на моментни забележувања (анг. „Work Sampling Method“), при што секое набљудувано отстапување од пропишаното упатство за монтажа на производот се регистрира како поединечна грешка. Во текот на ова истражување, методот се користи само при мерењето на овој показател. Формуларот за ММЗ е интегриран во главниот формулар за мерење на сите показатели, даден на Слика 5.11 Образец за собирање на податоците при снимањата. Оваа анализа е делумно субјективна

и во голема мера зависи од снимачот, а поради ограничување во поглед на човечки ресурси (снимачи), методот е применет на ниво на сценарио.

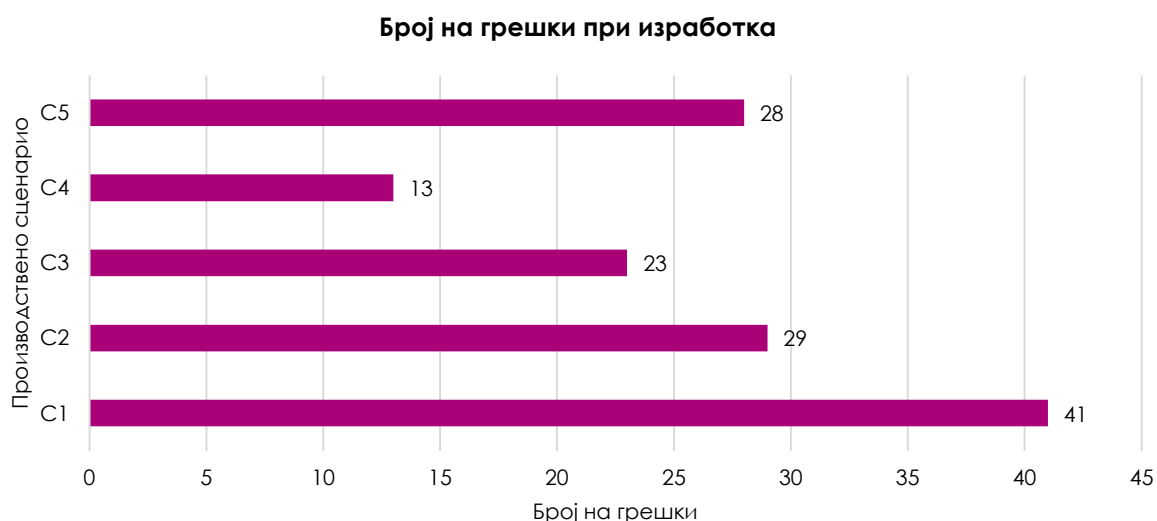
Пресметката на овој показател е едноставна и претставува сума од забележаните отстапки од упатството. Показателот се пресметува преку Равенка 5.21.

$$GI_i = \sum_{k=1}^n e_{k,i} \quad (5.22)$$

Каде што:

- GI_i - број на грешки при изработка во i -тото сценарио
- n - број на снимања/произведени парчиња
- $e_{k,i}$ - показател за грешка при k -тото набљудување во i -тото сценарио, при тоа:
 - o $e_{k,i} = \begin{cases} 1, & \text{ако има отстапување/грешка} \\ 0, & \text{ако нема отстапување} \end{cases}$

Резултатите од мерењата во сите сценарија се дадени на Слика 5.22.



Слика 5.22 Број на грешки при изработка

Со цел да се нормализира овој показател, истиот може да се трансформира како Број на грешки по производ, пресметано како:

$$GIR_i = \frac{GI_i}{PQ_i} \quad (5.23)$$

Каде што:

- GIR_i - број на грешки по производ при i -тото сценарио
- GI_i - вкупен број на грешки во i -тото сценарио
- PQ_i - произведена количина за i -тото сценарио

На Слика 5.23, даден е дијаграм за споредба на показателот низ сценаријата, сведен на бројот на производи.



Слика 5.23 Број на грешки по производ

ДВ_7 - Севкупна ефикасност на работната сила

Севкупната ефикасност на работната сила (OLE) е показател кој често е застапен во релевантната литература и е изведен од добро познатиот концепт OEE - Севкупна ефикасност на опремата, но се применува во ситуации кога процесите се претежно рачни или човекот претставува клучен носител на перформансите.

Севкупната ефикасност на работната сила претставува сложен, агрегатен показател кој ја интегрира достапноста, перформансите и квалитетот на извршувањето на работните задачи од страна на извршителите, овозможувајќи целосна и структурирана проценка на ефикасноста на човечкиот труд во производните системи. OLE се пресметува според формулата:

$$OLE_i = D_i \cdot P_i \cdot QR_i \quad (5.24)$$

Каде што:

- OLE_i - севкупна ефикасност на работната сила на i -тото сценарио
- D_i - достапност на i -тото сценарио

$$D_i = WOT - \frac{tdz_i}{WOT} \quad (5.25)$$

- WOT - вкупно ефективно време на извршител - во реалност ова е целосното работно време без времето за паузи, додека во оваа студија на случај бидејќи не се работи за целосно работно време вкупното ефективно време едноставно се пресметува како $WOT = PQ \cdot ti$
- P_i - перформанс на i -тото сценарио

$$P_i = \frac{PQi}{PQi^{theor}} \quad (5.26)$$

- PQi^{theor} - теоретска количина на произведени производи на i -тото сценарио

$$PQi^{theor} = PQi + \frac{tdz}{ts} \quad (5.27)$$

- QR_i - стапка на квалитет на i -тото сценарио, според Равенка 5.19



Слика 5.24 Севкупна ефективност на работната сила по производствено сценарио

Дијаграмот на OLE даден на Слика 5.24 покажува постепено зголемување на севкупната ефикасност на трудот од C1 (73%) до C5 (93%), што укажува дека воведените дигитални решенија во овие сценарија директно придонесуваат за подобрување на перформансите на операторите. По C5 се забележува благо намалување и стабилизација (C6 - C9 околу 83 - 87%), што може да укажува на заситување или воведување технологии кои не влијаат директно на продуктивноста. Ова сугерира дека одредено ниво на дигитална поддршка носи оптимален ефект, по што дополнителните интервенции имаат ограничен придонес кон OLE.

5.3.2.3. Трошоци

Третата подгрупа на показатели за дигитална вредност се показателите за трошоци. Во оваа група сите показатели се изведени од претходните групи.

- DV3.2 Цена на чинење на застојот
- DV4.3 Цена на чинење на шкарт

Цената на чинење на застој претставува економска загуба изразена во парични единици, која настанува како резултат на неискористениот производствен капацитет за време на застој. Таа се определува преку бројот на производи кои не се произведени, иако можеле да бидат произведени во услови на нормално функционирање на процесот, помножен со цената на чинење на еден производ. На овој начин, цената на застој ја рефлектира директната врска помеѓу временските прекини во производството и нивното економско влијание врз производствениот систем.

$$CZ_i = Q_i^{zaguba} \cdot C\check{c} \quad (5.28)$$

Каде што:

- CZ_i - цена на чинење на застојот во i -тото сценарио.
- QZ_i - количина на производи кои можеле да се произведат за време застојот, доколку истиот не се случил, се пресметува како:

$$QZ_i = \frac{tdz_i}{ts_i} \quad (5.29)$$

- $C\check{c}$ - цена на чинење на производот, усвоено: $C\check{c} = 35$ ПЕ

Оваа пресметка покажува колку производи можеле да се произведат во времето на застој, доколку процесот функционира со стандардната брзина. Изгубената количина поради застој е пресметана како однос помеѓу вкупното време на застој и Времето на изработка за производство на еден производ, со што се добива бројот на потенцијални производи кои не се произведени.

Кај цената на чинење на шкартот, пресметката е поедноставна бидејќи тука се множат шкарт производите забележани во сценариото со цената на чинење на еден производ. Од тука добиваме, во парични единици, колку чини шкартот.

$$CS_i = SQ_i \cdot C\check{c} \quad (5.30)$$

Каде што:

- CS_i - цена на чинење на шкартот при i -тото сценарио
- SQ_i - Количина на шкарт при i -тото сценарио
- $C\check{c}$ - цена на чинење на производот, усвоено: $C\check{c} = 35$ ПЕ



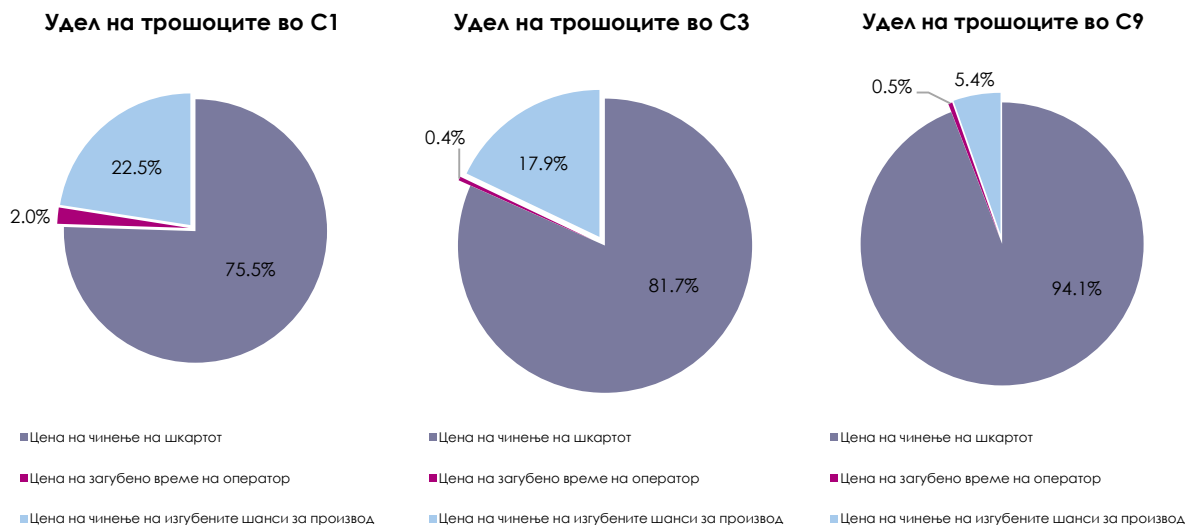
Слика 5.25 Цена на чинење на застојот и шкартот

Иако не се во фокус, постојат и други трошоци кои може да се пресметаат од измерените или пак со усвојување на одредени големини. На Слика 5.26, за три карактеристични сценарија - C1, C3 и C9, даден е уделот на типовите на трошоци во вкупните трошоци, ако вкупните трошоци ги пресметаме како:

$$C_{vki} = CS_i + CZ_i + CI_i \quad (5.31)$$

Каде што:

- C_{vki} - Вкупни трошоци на i -тото сценарио
- CS_i - Цена на чинење на шкартот на i -тото сценарио
- CZ_i - цена на чинење на застојот на i -тото сценарио
- CI_i - цена на чинење на загубеното време на извршителот



Слика 5.26 Удел на одделните типови на трошоци во вкупните трошоци

5.3.2.4. Флексибилност

За флексибилноста на процесот има различни дефиниции и литературата различно го дефинира. Дел од литературата, флексибилноста се пресметува како однос од дозволената вредност на одреден показател со неговата реална (измерена) вредност. На ваков начин е изведен показателот:

- ДВ_9 - Индекс за флексибилност

ДВ_9 - Индекс за флексибилност

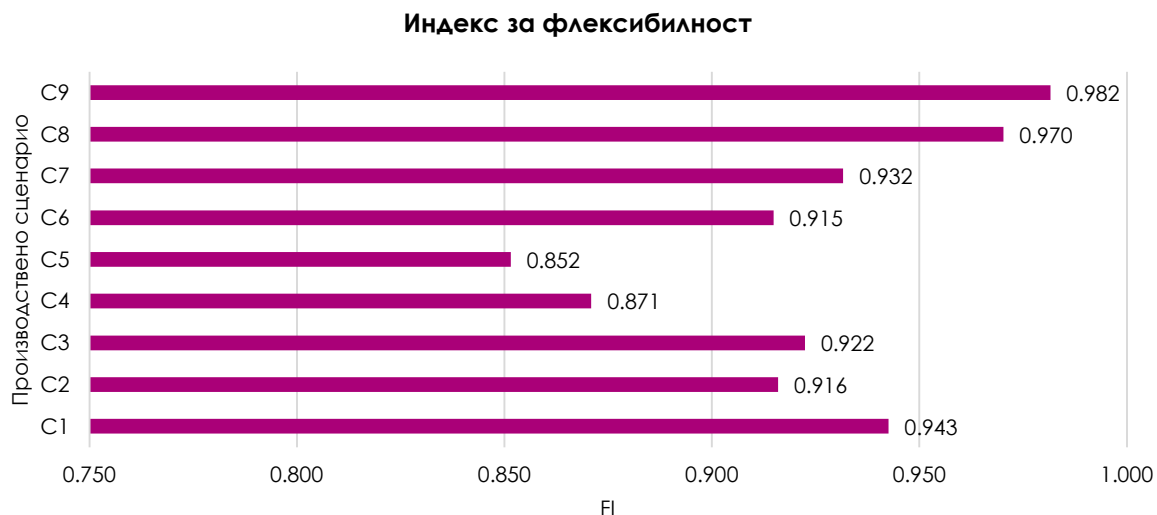
Општата формула за индексот за флексибилност е дадена со Равенка 5.32. Логиката на индексот на флексибилност се базира на однос помеѓу дозволената (референтна) и реално измерената вредност на показателот, со цел да се оцени способноста на системот да одговори во рамки на поставените граници.

$$FI_i = \frac{\text{дозволена вредност на показателот}}{\text{измерена вредност на показателот}} \quad (5.32)$$

Овој показател ќе го разгледаме од аспект на време на изработка. Доколку претпоставиме дека потребната количина на производство ($PQ = 400$ производи/ден), би можеле за секое сценарио да го пресметаме тактното време, притоа тоа да го искористиме како дозволената вредност при пресметката на индексот за флексибилност. Реалистично, тактното време би требало да биде максималната вредност на времето за производство на еден дел за да се постигне потребната количина. Тактното време ќе се пресмета преку равенката:

$$\text{Такт} = \frac{s_d \cdot t_s}{PQP} = \frac{1 \cdot 8 \cdot 60}{400} = 1,2 \frac{\text{производи}}{\text{минута}} \quad (5.33)$$

Според ова, дозволената вредност Времето на изработка е 1,2 минути или 72 секунди за еден производ. Доколку ги пресметаме сега индексите за флексибилност согласно Равенката 5.32 и измерените вредности на Времето на изработка се дадени во 5.4.2.1., го добиваме дијаграмот на Слика 5.27.



Слика 5.27 Индекс за флексибилност

Анализата може да се направи помеѓу сценарија, но може да се дискутира и само ниво на едно сценарио:

- $FI < 1$ - измерената вредност е поголема од дозволената вредност. Ова укажува дека процесот покажува повисока флексибилност од минимално потребната, односно ги надминува поставените барања.
- $FI > 1$ - измерената вредност е помала од дозволената вредност. Ова значи дека процесот не го достигнува бараното ниво на флексибилност и постои јасен простор за подобрување.
- $FI = 1$ - процесот го исполнува минималното барање, но без никаква резерва. Оваа состојба е гранична, бидејќи и мала промена во условите може лесно да го направи процесот нефлексибилен, поради што е потребно зголемено внимание и континуирано следење.

Од дијаграмот се гледа дека сите сценарија се на страната на позитивна флексибилност т.е. сите резултати се помали од 1. Ова, во контекст на време на производство, значи дека производниот план и реалните услови можат да бидат до одредена мера флексибилни т.е. времињата на изработка на некои делови можат да се пролонгираат, а евентуалните застои подобро да се апсорбираат во производствениот план без некои позначајни негативни ефекти. Сепак голем дел од сценаријата на пример C8 и C9 се многу блиску до граничната вредност и при вакви услови треба да биде јасно дека отстапките на показателот во текот на смената како и застоите треба да се сведат на минимум.

Истиот принцип на пресметка може да се аплицира и на другите показатели како што е на пример времетраење на застој каде ќе биде потребно да се дефинира очекуван максимален застој (што е и показател дефиниран со стандардот) или пак со стапка на квалитет, каде потребно да се дефинира очекуван број на шкарт делови, што повторно се среќава и во стандардот и во практиката.

Во литературата постојат и други начини за анализирање на флексибилноста од различна перспектива, како на пример показателот за број на различни производи без промени на производниот процес (NP). Овој показател едноставно го регистрира бројот

на различни делови кои можат да се произведат со една иста производна опрема без истата (значително) да се менува.

5.3.3. Показатели за дигитална култура

Податоците за оваа група на показатели се поврзани со поимот **дигитална култура**, кој во рамки на овој труд се дефинира како нивото на прифаќање, адаптација и интеграција на дигиталните решенија во секојдневните активности на организацијата. Дигиталната култура ги опфаќа знаењата, ставовите и практиките кои овозможуваат ефективна употреба на дигиталните технологии со цел зголемување на продуктивноста и поттикнување на иновациите. Како што е наведено во Поглавје 4, мерењето на дигиталната култура во голема мера има субјективен карактер и зависи од контекстот и зрелоста на претпријатието, особено во однос на слојот „Луѓе“ на дигиталната трансформација. Ограничување на ова истражување е тоа што, поради типот на истражувањето, не е можно да се мери показател од област на знаење и способности а извршителите, бидејќи истражувањето не вклучува континуирана обука на учесниците.

Врз основа на оваа дефиниција и релевантните теоретски поставки, во овој труд се развиени сопствени показатели за оценување на дигиталната култура, прилагодени на целите и експерименталниот дизајн на истражувањето. Создадените показатели се групирани во три тематски категории кои директно кореспондираат со дефиницијата на дигиталната култура, и тоа: **промени, иновации и мотивација**. Овие групи овозможуваат систематско и структурирано согледување на влијанието на различните производствени сценарија врз аспектите на дигиталната култура, при што показателите не се наменети за универзална стандардизација, туку за компаративна анализа во рамки на конкретниот труд. Прашалникот (Прилог 7), е дистрибуиран до сите учесници во истражувањето (извршителите), а при обработката на податоците, создадени се осум различни показатели, од кои дел ќе бидат презентирани во продолжение. Целосните резултати од прашалникот преземени од софтверот за анкети се наоѓаат во Прилог 7.

5.3.3.1. Прилагодување на промени

ДК_1 - Ниво на прилагодување на промената на сценаријата

Показателот ниво на прилагодливост на промените на сценаријата го оценува степенот до кој извршителите (операторите) лесно се прилагодуваат на промените што се воведуваат при премин од едно производствено сценарио кон следното. Овој показател се базира на субјективна проценка на операторите и ја одразува нивната генерална перцепција за адаптацијата на новите дигитални решенија имплементирани во секое наредно сценарио.

Проценката се врши преку анкетен прашалник, при што операторите ја оценуваат леснотијата на прилагодување при премин од претходното кон тековното сценарио на Ликертова скала од 1 до 5, каде што пониските вредности означуваат потешка, а повисоките вредности полесна адаптација. Оценките се однесуваат на целокупниот ефект од промените во сценариото, вклучувајќи нови дигитални решенија, промени во организацијата на работата или модификации на работните процедури. Нивоата на прилагодливост на секое сценарио може да се пресметаат како:

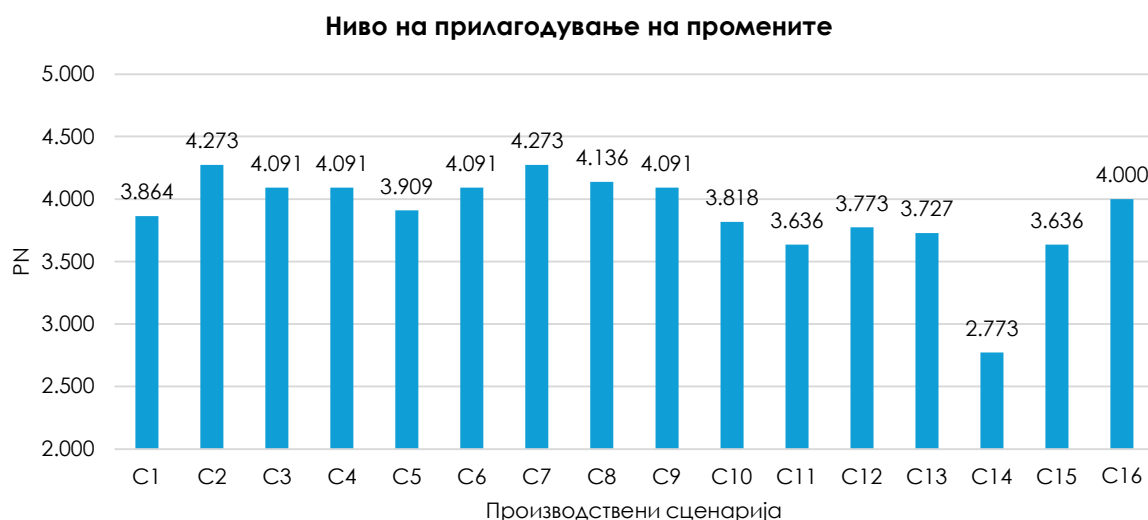
$$PN_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N p_{i,k} \quad (5.33)$$

Каде што:

- PN_i - Ниво на прилагодливост на i -тото сценарио
- $p_{i,k}$ - оценка дадена од k -тиот извршител за сценариото i
 - $p_{i,k} \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$
- N - број на извршители кои одговориле на прашалникот, $N = 22$

За секое сценарио, нивото на прилагодливост се добива како просечна вредност од оценките дадени од сите оператори. На овој начин се добива агрегирана оценка во интервал од 1 до 5, која овозможува споредба на сценаријата според тоа колку успешно и непречено операторите ги прифаќаат и интегрираат воведените промени. Повисокото ниво на прилагодливост укажува на подобро прифаќање на решенијата и повисока дигитална култура кај извршителите.

На Слика 5.28 дадена е дијаграм со проценката на нивото на прилагодување на извршителите на секое од сценаријата



Слика 5.28 Ниво на прилагодување на промените (сценаријата)

ДК_2 - Ниво на проценет когнитивен и физички напор

На целосно идентичен начин (метод и формули) се добиваат и показателите ДК_2 - Ниво на проценет когнитивен напор и ДК_3 - Ниво а проценет физички напор, согласно Равенка 5.34 и Равенка 5.35, респективно.

$$MN_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N mn_{i,k} \quad (5.34)$$

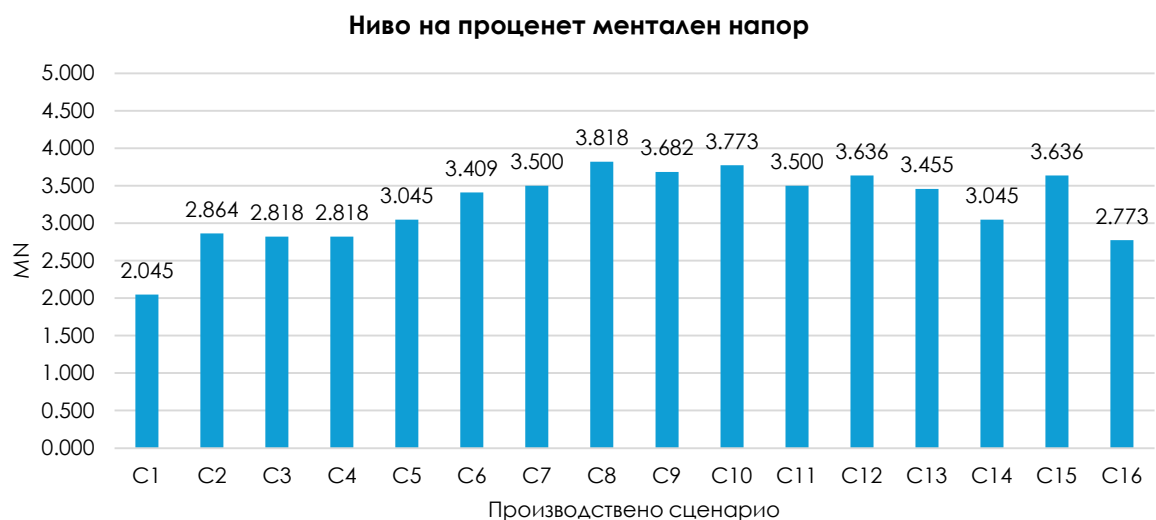
$$FN_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N fn_{i,k} \quad (5.35)$$

Каде што:

- MN_i - Ниво на проценет когнитивен напор при i -тото сценарио
- FN_i - Ниво на проценет физички напор при i -тото сценарио
- $mn_{i,k}$ - оценка дадена од k -тиот извршител за сценариото i
 - $m_{i,k} \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$
- $fn_{i,k}$ - оценка дадена од k -тиот извршител за сценариото i
 - $f_{i,k} \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$
- N - број на извршители кои одговориле на прашалникот, $N = 22$

Показателот **ниво на проценет когнитивен напор (MN)** го оценува субјективниот напор што извршителите го доживуваат при извршување на задачите во рамки на секое производствено сценарио. Тој се однесува на когнитивниот товар поврзан со концентрација, обработка на информации, донесување одлуки и следење на работните инструкции, особено во услови на воведување нови дигитални и организациски решенија. Пониските вредности означуваат понизок когнитивен напор, додека повисоките вредности укажуваат на зголемен когнитивен товар. Оценката ја одразува целокупната перцепција на извршителите за сложеноста и менталната оптовареност при работа во даденото сценарио.

Слика 5.29 ги дава резултатите по сценарио за показателот, согласно добиените податоци во прашалникот и нивната пресметка според Равенка 5.34.



Слика 5.29 Ниво на проценет когнитивен напор

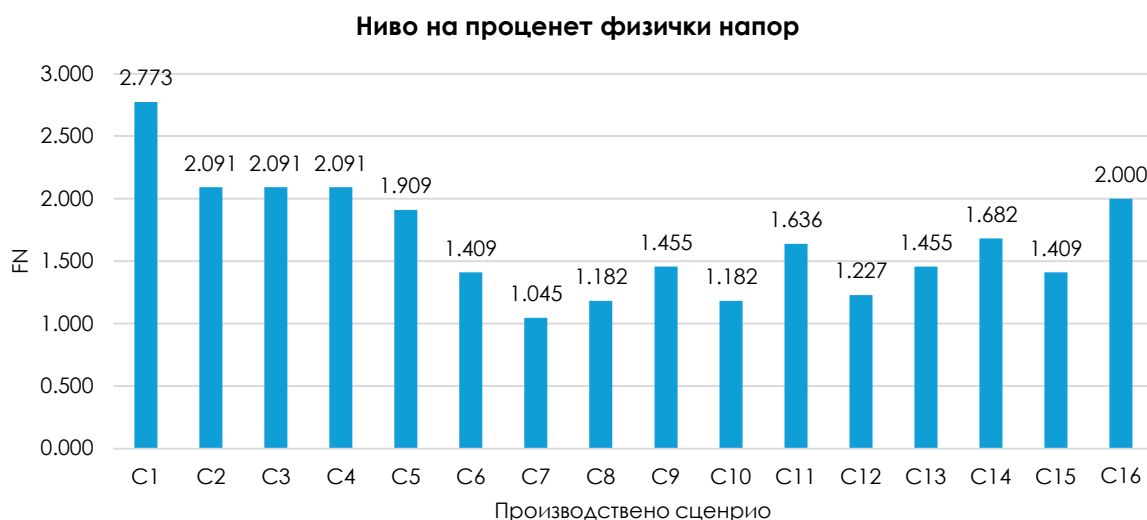
Анализата на нивото на проценет когнитивен напор по сценарија покажува јасен тренд на зголемување со порастот на комплексноста на производствениот процес и бројот на воведени дигитални елементи. Во почетните, претежно рачни сценарија (C1 - C4), менталниот напор е низок и релативно стабилен, што укажува на ограничени когнитивни барања. Со воведување на дополнителни задачи и почетни дигитални решенија (C5 - C10), се забележува изразен пораст и достигнување на максимални вредности, што упатува на зголемен когнитивен товар поврзан со адаптација, паралелна обработка на информации и донесување одлуки. Кај дигитализираните процеси (C7 - C8), каде дигиталните системи активно го поддржуваат или управуваат процесот, менталниот напор достигнува највисоки вредности, што укажува на зголемени когнитивни барања поврзани со координација, следење и донесување одлуки. Во последната група, сценаријата со апликации за производство (C11 - C16), и покрај

највисокиот дигитален интензитет, се забележува стабилизација или намалување на менталниот напор. Ова упатува дека повисокото ниво на интеграција и зрелост на дигиталните решенија ја намалува когнитивната оптовареност и ја подобрува поддршката за операторот.

ДК_3 - Ниво на проценет физички напор

Показателот **ниво на проценет физички напор (FN)** го оценува субјективното чувство на физичко оптоварување што извршителите го доживуваат при извршување на задачите во рамки на секое производствено сценарио. Тој се однесува на физичкиот напор поврзан со телесни движења, манипулација со делови и алати, повторливи активности, како и одржување на работни позиции, кои можат да влијаат врз заморот и ергономската оптовареност на извршителите. Пониските вредности означуваат понизок физички напор, додека повисоките вредности укажуваат на зголемено физичко оптоварување. Оценката ја одразува целокупната перцепција на извршителите за физичките барања на работата во даденото сценарио.

Слика 5.30 ги дава резултатите по сценарио за показателот, согласно добиените податоци во прашалникот и нивната пресметка според Равенка 5.35.



Слика 5.30 Ниво на проценет физички напор

Нивото на проценет физички напор покажува спротивен тренд во однос на менталниот напор. Кај базичните сценарија (C1 - C4), каде доминира рачната работа, физичкиот напор е очекувано највисок. Со воведување на асистенти за монтажа и дигитализирани процеси (C5 - C10), се забележува јасно намалување на физичкиот напор, како резултат на подобрена ергономија и технолошка поддршка. Кај сценаријата со апликации за производство (C11 - C16), физичкиот напор останува релативно стабилен на пониско ниво, што укажува дека дигиталните решенија ефективно ја редуцираат физичката оптовареност, и покрај зголемената процесна комплексност.

5.3.3.2. Мотивација

ДК_4 - Ниво на мотивација

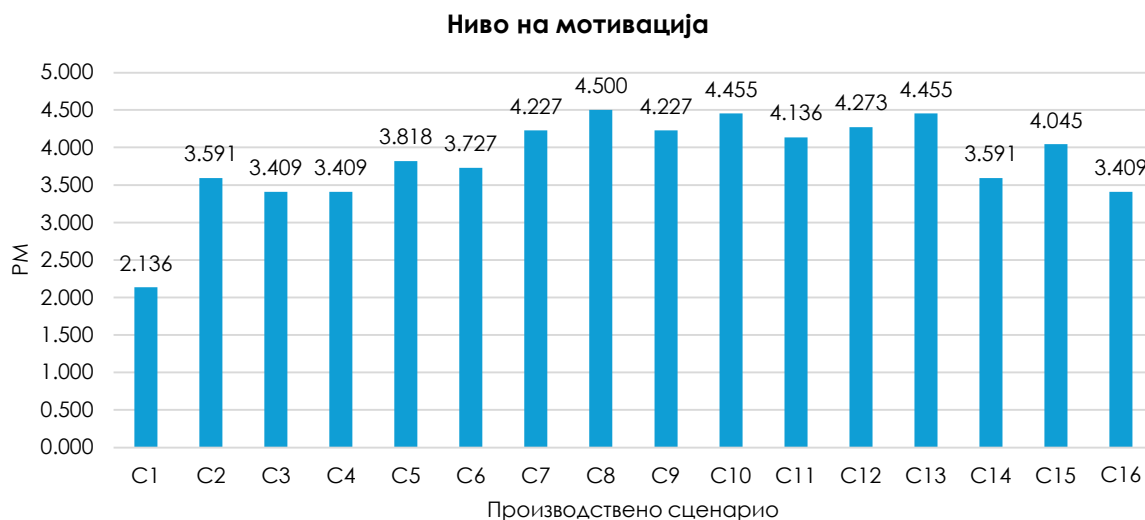
Нивото на мотивација претставува субјективен показател кој ја одразува перцепцијата на извршителите за сопствената мотивираност при извршување на конкретно производствено сценарио. Показателот се собира по завршување на сите снимања, при што извршителите ја оценуваат сопствената мотивација во контекст на воведените промени во сценариото, односно применетите дигитални решенија. Овој показател овозможува проценка на влијанието на различните нивоа и типови на дигитална поддршка врз мотивацијата на операторите и претставува важна компонента во анализата на дигиталната култура и прифаќањето на дигиталната трансформација.

Нивото на мотивација по сценарио се добива според Равенката X.

$$PM_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N pm_{i,k} \quad (5.35)$$

Каде што:

- PM_i - Ниво на мотивација при i -тото сценарио
- $pm_{i,k}$ - оценка дадена од k -тиот извршител за сценариото i
 - $pm_{i,k} \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$
- N - број на извршители кои одговориле на прашалникот, $N = 22$



Слика 5.31 Проценето ниво на мотивација

Резултатите дадени на Слика 5.31 прикажуваат нерамномерно движење на интензитетот на мотивација на извршителите. Ова е индикатор дека зголемувањето на бројот на дигитално поддржани чекори и разновидноста на технологиите низ сценаријата, спротивно од очекуваното, не влијае праволиниски на мотивацијата туку зависи од типот на решението.

ДК_5 - Ниво на вклученост во донесување на одлуките

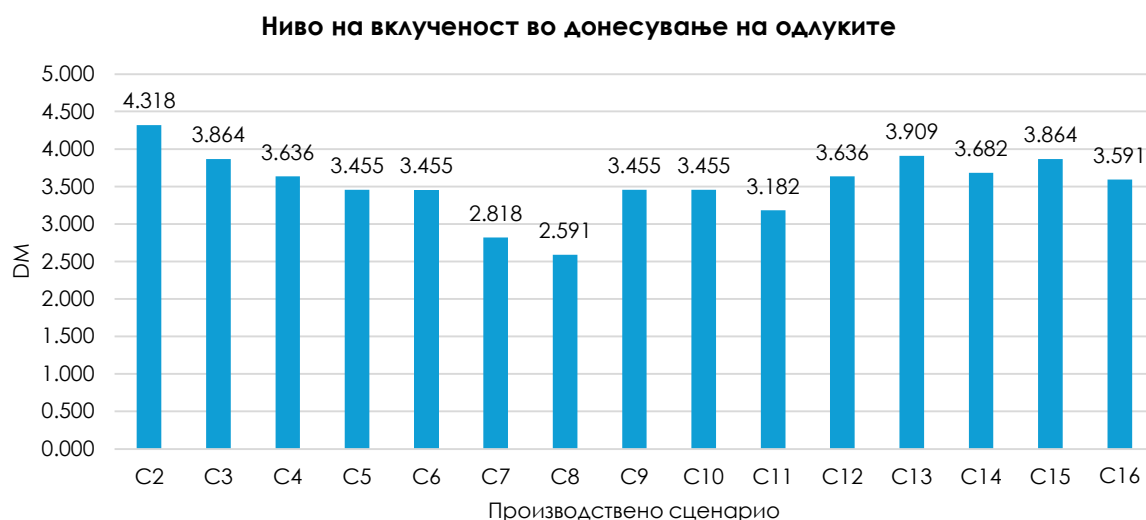
Показателот „Ниво на вклученост во донесување на одлуките“ го мери степенот до кој извршителите се активно вклучени во процесите на предлагање, избор и

имплементација на дигитални решенија. Тој укажува на нивното учество и влијание во одлучувањето, што директно влијае врз прифаќањето на промените и развојот на дигиталната култура во организацијата.

$$DM_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N dm_{i,k} \quad (5.36)$$

Каде што:

- DM_i - Ниво на мотивација при i -тото сценарио
- $dm_{i,k}$ - оценка дадена од k -тиот извршител за сценариото i
 - $dm_{i,k} \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$
- N - број на извршители кои одговориле на прашалникот, $N = 22$



Слика 5.32 Ниво на вклученост во донесување на одлуки

ДК_6 - Ниво на леснотија за употреба на решенијата

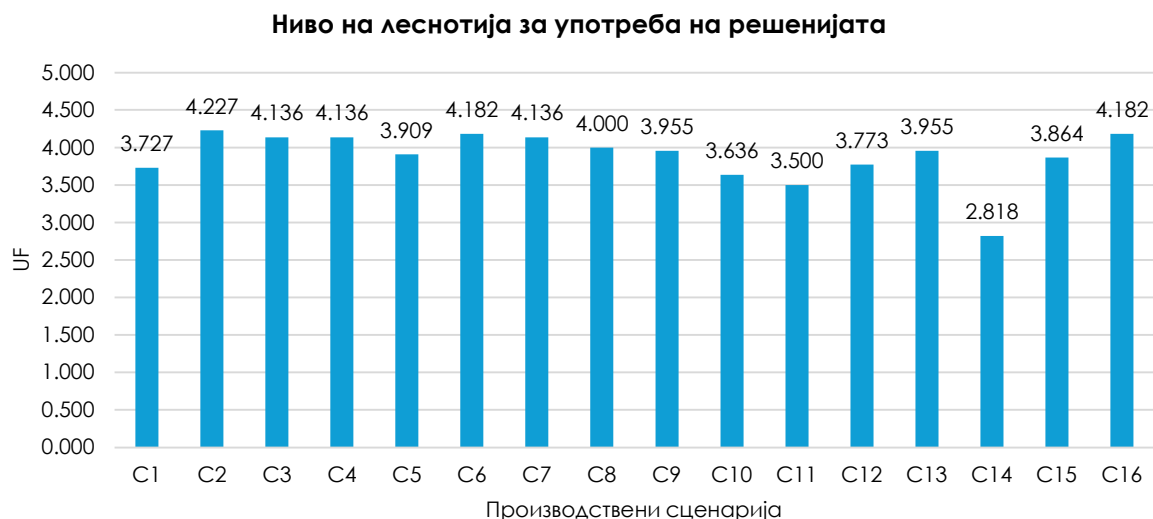
Нивото на леснотија за употреба на решенијата (UF) ја оценува перцепцијата на операторите за тоа колку дигиталните алатки и технологии се едноставни, интуитивни и разбирливи за користење. Тој укажува на степенот на прифатливост и практична применливост на решенијата во секојдневната работа, што директно влијае врз ефикасноста и мотивацијата на извршителите.

$$UF_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N uf_{i,k} \quad (5.37)$$

Каде што:

- DM_i - Ниво на леснотија за употреба на решенијата при i -тото сценарио
- $uf_{i,k}$ - оценка дадена од k -тиот извршител за сценариото i
 - $dm_{i,k} \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$
- N - број на извршители кои одговориле на прашалникот, $N = 22$

На Слика 5.50 даден е дијаграмот за показателот низ сите сценарија согласно просечните оценки на извршителите. Може да се забележи генерално добро прифаќање и разбирање на решенијата, притоа како нај лесно за користење (ако се исклучат сценарио C1 и C2 во кои нема дигитални решенија), е C6 (автоматизиран транспорт), додека како најслабо е оценето C14 односно ERP системот. Од асистентите за монтажа, Smart Poka Yoke и Pick to Light се подеднакво оценети, за разлика од аугментираната реалност која има послаба оценка во однос на нив две.



Слика 5.33 Ниво на леснотија за употреба на решенијата

5.3.4. Показатели за дигитален интензитет

Категориите во оваа група на показатели поврзани со две категории: инфраструктура и инвестиции. Изворот на овие показатели е литературата и истите се стратешки показатели кои најчесто можат да се сретнат во извештаите на консултантските куќи или европските тела:

- Инфраструктура
 - ДИ_1 - Стапка на дигитално потпомогнати задачи/активности
- Инвестиции
 - ДИ_2 - Време на поврат на инвестицијата

5.3.4.1. Инфраструктура

ДИ_1 - Стапка на дигитално потпомогнати задачи/активности

Показателот стапка на дигитално потпомогнати (DZR) активности/чекори го оценува степенот на примена на дигитални решенија во рамки на секое производствено сценарио. Тој ја одразува застапеноста на задачи кои се изведуваат со поддршка на дигитални технологии (на пр. дигитални инструкции, сензори, информациски системи, визуелни или автоматизирани помагала) во однос на вкупниот број задачи потребни за извршување на сценариото.

Пресметката на овој показател се базира на директно идентификување и броење на дигитално потпомогнати задачи во секое сценарио. Секоја задача се третира како еднаква единица, при што се прави јасна дистинкција дали задачата е изведена со дигитална

поддршка или без неа. На овој начин, показателот го мери интензитетот на дигитална интеграција на процесно ниво, без да навлегува во ефикасноста или сложеноста на поединечните задачи.

За секое сценарио, стапката на дигитално потпомогнати задачи се добива како однос помеѓу бројот на дигитализирани чекори и вкупниот број чекори во сценариото, изразен во проценти. Повисоките вредности на показателот укажуваат на поголем степен на дигитална поддршка на процесот, додека пониските вредности укажуваат на доминантно рачно или традиционално извршување на задачите. Овој показател служи како квантитативна основа за споредба на сценаријата во однос на нивниот степен на дигитализација. Овој показател во производствен систем може да се користи за идентификација на потенцијал за понатамошна дигитализација, бидејќи јасно укажува кои процеси и активности сè уште се доминантно рачни и каде постои простор за воведување дигитална поддршка. Истовремено, тој овозможува следење на развојот на дигиталниот интензитет со текот на времето, при што служи како индикатор за напредок при фазна имплементација на дигитални технологии. Дополнително, показателот обезбедува едноставна и квантитативна основа за поддршка при донесување одлуки, овозможувајќи приоритизирање на идни дигитални интервенции без потреба од сложени анализи.

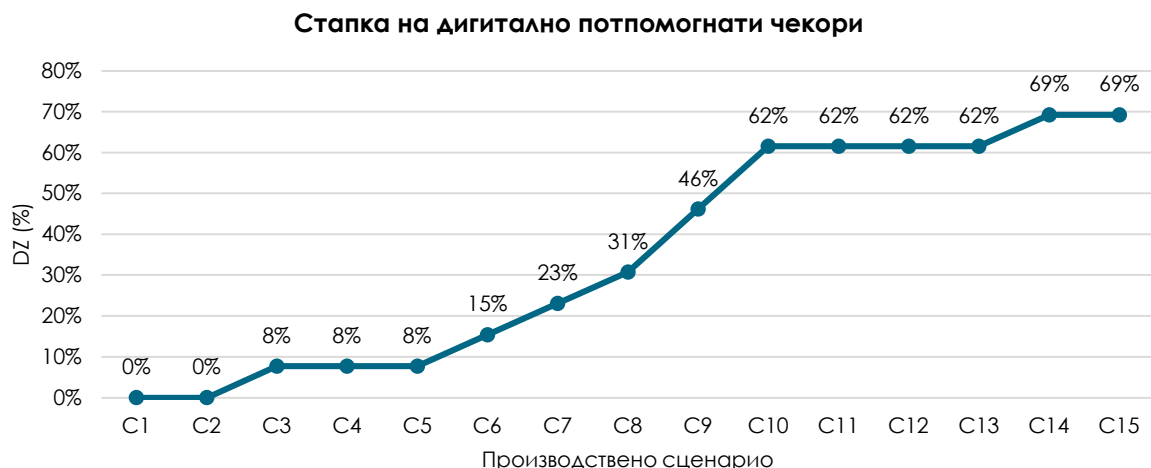
Равенка 5.38 го дава начинот на пресметка на стапката за дигитално потпомогнати задачи во секое од сценаријата.

$$DZR_i = \frac{C_i^{dig}}{C_i^{vk}} \cdot 100\% \quad (5.38)$$

Каде што:

- DZR_i - стапка на дигитално потпомогнати чекори во i -тото сценарио
- C_i^{dig} - број на дигитално потпомогнати операции во i -тото сценарио
- C_i^{vk} - вкупно операции во i -тото сценарио

Прилог 5, преку дијаграмите на тек, дава претстава за чекорите кои се потпомогнати од дигитални технологии, преку истакнување на чекорот со различна боја. Целосната пресметка е дадена во Прилог 8. Секое сценарио е замислено да биде со повисоко ниво на дигитализација, што се гледа и од трендот на Слика 5.34 каде е прикажан дијаграм за стапката за дигитално потпомогнати чекори низ сценаријата.



Слика 5.34 Стапка на дигитално потпомогнати чекори/активности

Овој дијаграм сепак има ограничување, т.е. дава резултати како да сите дигитализирани чекори да се подеднакво важни за претпријатието, што во практиката речиси никогаш не е така. На пример, чекорот за монтажа е веројатно најважниот чекор за SLFS поради фактот што 100% од вредноста во процесот се создава токму при овој процес, за разлика од, на пример, Сценарио 15 каде имаме имплементација на софтвер за проверка на 5S чие влијание на додадената вредност е значително помало и тешко да се измери.

Поради споменатиот недостаток, ќе бидат зададени тежински фактори на секој од дигитализираните чекори. Тежинските фактори ќе бидат зададени според честотата на користење на дневно дневно ниво на водечкиот дигитален концепт во сценариото. **Табела 5.8** ја дава табелата со сценаријата, водечките дигитални концепти, честотата на нивното користење во еден ден и проценетиот тежински фактор. C1 и C2 не се вклучени во табелата поради тоа што немаат дигитализирани чекори.

Табела 5.8 Тежински фактори на дигитализацијата на сценаријата

Сценарио	Водечки дигитален концепт	Честота на користење	Тежински фактор
3	Асистент за монтажа	За секој производ, влијае на ДВ	1
4	Асистент за монтажа	За секој производ, влијае на ДВ	1
5	Асистент за монтажа	За секој производ, влијае на ДВ	1
6	Лентест транспортер	За секој производ	0.8
7	Камера за 2Д машинска визија	За секој производ	0.8
8	SCARA робот	За секој производ	0.8
9	Андон светло	За секој производ	0.8
10	Сензор	0 - 1 пати на ден	0.1
11	Систем за енергетски менаџмент	За секој производ	0.8
12	Систем за менаџмент на одржување	0 - 3 пати на ден	0.2
13	Апликација за анализа	0 - 1 пати на ден	0.1
14	ERP систем	За секој производ	0.8
15	Апликација за аудит	1 на ден	0.3
16	Апликација за аудит	1 на ден	0.3

Изведениот показател дигитално потпомогнати решенија со тежински фактори (DZTR) се пресметува според Равенка 5.39.

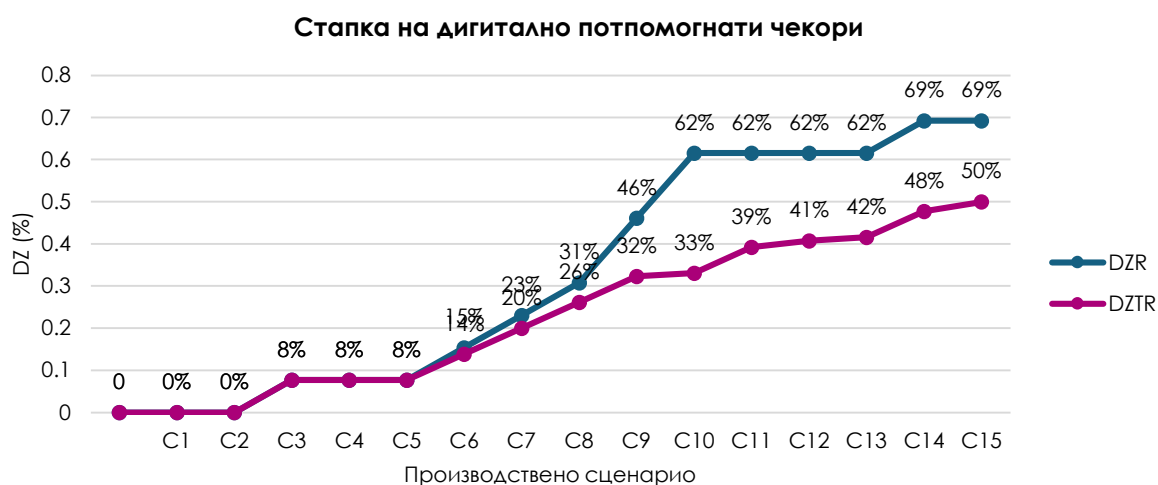
$$DZTR_i = DZR_i \cdot w_i$$

Каде што:

- w_i - е тежински фактор за водечкиот дигитален концепт во i -тото сценарио.

На Слика 5.35 даден е споредбен дијаграм на резултатите од Слика 5.34 за стапка на дигитално потпомогнати чекори низ сценаријата (DZR) и стапка на дигитално потпомогнати решенија со тежински фактори (DZTR).

Од дијаграмот се забележува дека и после имплементацијата на тежинските фактори за да се добие новиот, пореалистичен показател, сепак трендот на показателот е повторно растечки. Има разлика во влијанието на тежинските фактори од сценарио до сценарио, па така најголемо „негативно влијание“ врз DZR има тежинскиот фактор во сценарио C10 (намалување од 29%), следено од C11 (23%) итн. Покрај сценаријата во кои DZR е еднаков на DZTR (C1 - C5), најмало е влијанието кај C8 каде DZR се намалува за 5%.



Слика 5.35 Стапка на дигитално потпомогнати чекори со наспроти без тежински фактори

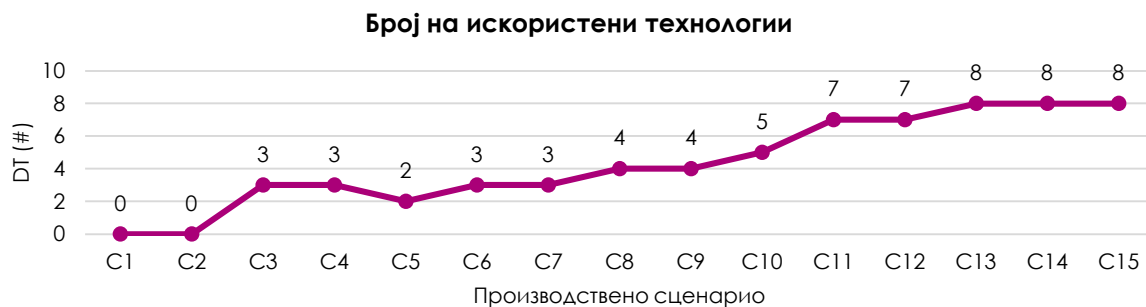
Дигиталниот интензитет може да се пресметува и преку бројот на искористени технологии по сценарио. Вака може грубо да се процени технолошката разновидност на производствениот процес.

$$DT_i = \sum_{k=1}^k u_{i,k} \quad (5.39)$$

Каде што:

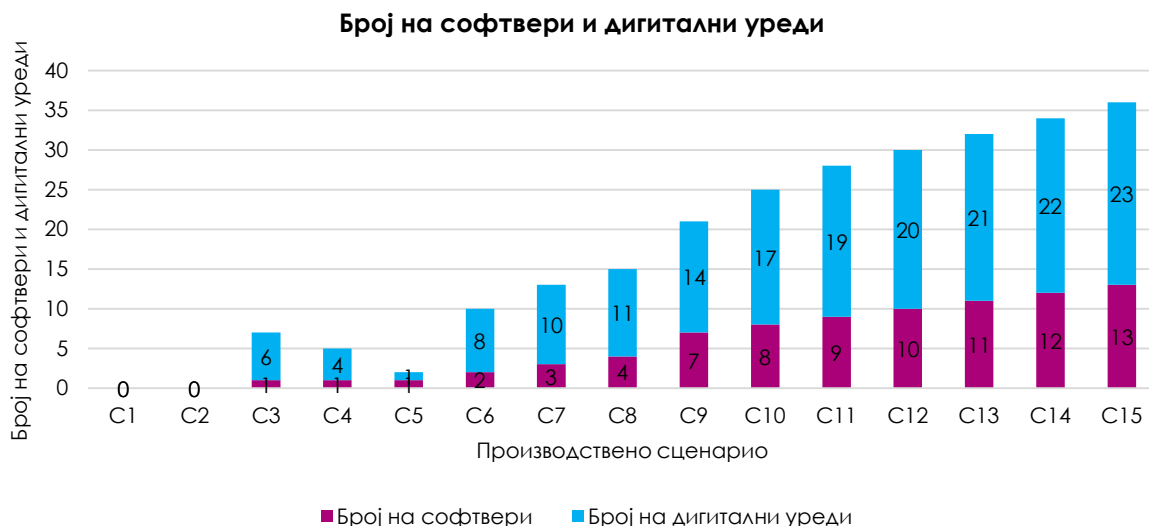
- DT_i - број на искористени технологии во i -тото сценарио
- $u_{i,k}$ - дигитална технологија во i -тото сценарио
 - $u_{i,k} = 1$ ако технологијата k е искористена во сценариото i , инаку $u_{i,k} = 0$
- k - вкупен број дигитални технологии
 - според поглавје 2.2.1, усвоено е $k = 11$

Според анализата во Прилог 5, каде во последната колона се истакнати технологиите застапени во одредено сценарио, овој показател дијаграмски е даден на Слика 5.36



Слика 5.36 Број на искористени технологии по сценарио

Со цел да се потенцира комплексноста на одредени технологии, може да се разгледува и бројот на софтвери и вградени дигитални уреди во секое од сценаријата. И двата показатели се пресметани на идентичен начин како и бројот на искористени технологии, а детална листа од софтверите и искористените дигитални уреди е дадена во Прилог 5 при претставувањето на експерименталните сценарија, а дијаграмски приказ од резултатот е даден на Слика 5.37.



Слика 5.37 Број на софтвери и дигитални уреди по сценарио

Показателите за број на искористени технологии, како и бројот на софтвери и дигитални уреди, во реално производство имаат значајна улога како показатели за технолошка разновидност и комплексност на системот. Високата вредност на овие показатели укажува на присуство на повеќе различни технологии, што имплицира поголема флексибилност и потенцијал за напредна интеграција, но истовремено и зголемена потреба од координација, одржување и управување со системот.

Од аспект на управување со човечки ресурси, овие показатели се особено корисни за планирање на обуки и развој на компетенции, бидејќи директно укажуваат на разновидноста на знаења и вештини потребни за ефективно функционирање на производниот процес. Поголем број технологии и дигитални алатки значи дека операторите треба да поседуваат поширок спектар на дигитални и технички компетенции, што може да влијае и врз стратегиите за вработување и селекција на кадар.

Дополнително, овие показатели може да се користат при стратегиско планирање на дигиталната трансформација, односно при одлучување дали да се продолжи со

диверзификација на технологиите или да се насочи кон стандардизација и интеграција на постоечките решенија. Во тој контекст, тие даваат основа за проценка на балансот помеѓу иновативноста и оперативната сложеност, што е клучно за одржлив развој на производните системи.

5.3.4.2. Инвестиции

ДИ_2 - Време на поврат на инвестицијата

Поврат на инвестиција (ROI) претставува показател кој ја мери економската исплатливост на инвестицијата, изразувајќи го односот помеѓу остварената корист (добивка или заштеда) и вложените средства, при што повисока вредност укажува на поефикасна и поисплатлива инвестиција. За пресметка на повратот на инвестиција, користена ќе биде Равенка 5.40.

$$ROI_i = \frac{P_{ni}}{T_i} \quad (5.40)$$

Каде што:

- ROI_i - е повратот на инвестиција за i -тото сценарио во месеци
- P_{ni} - е нето профит на претпријатието во i -тото сценарио
- T_i - висина на инвестицијата за i -тото сценарио, усвоена според документацијата за набавка на опремата во SLFS и анализа на пазарот за модулите за кои нема конкретна информација во документацијата

Тука треба да се напомене дека искористените големини се проектирани, т.е. со цел да се пресмета нето профитот во студијата на случајот, по сценарио најпрво пресметан е годишниот капацитет на производство на парчиња, согласно Времето на изработка според Равенка 5.41.

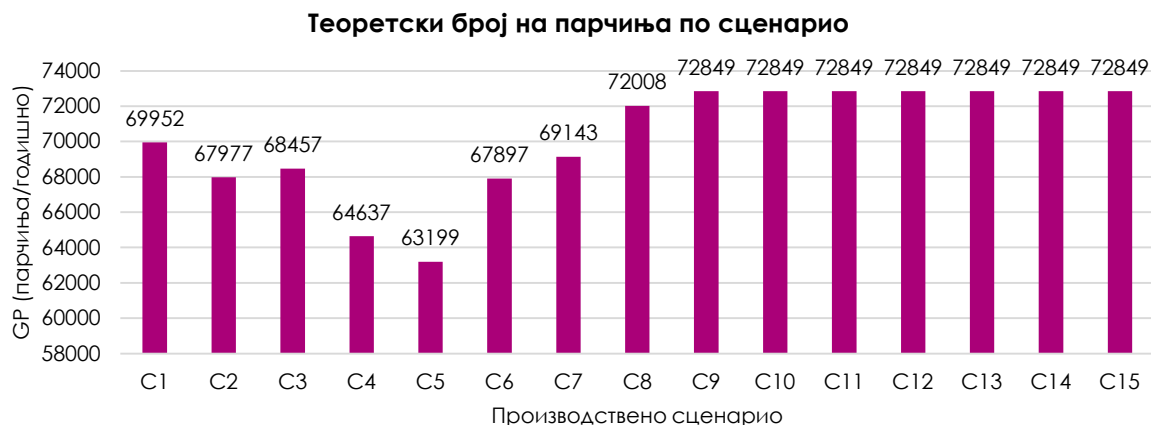
$$GP_i = DP_i \cdot s_d \cdot t_s \cdot d_0 \cdot \eta_{ev} \cdot \eta_{en} \quad (5.41)$$

$$DP_i = \frac{K_p}{ts_i} \quad (5.42)$$

Каде што:

- GP - теоретско годишно производство на i -тото сценарио
- DP - потенцијално дневно производство на i -тото сценарио
- K_p - потенцијален капацитет
- ts_i - Време на изработка на i -тото сценарио
- s_d - смени во денот
- t_d - часови во смена
- d_0 - работни денови во годината
- η_{ev} - степен на користење на капацитетите (зависи од внатрешните фактори)
- η_{en} - степен на користење на капацитетите (зависи од надворешните фактори)

За сите одделни сценарија, теоретското годишно производство во парчиња/годишно дадено е на Слика 5.38.



Слика 5.38 Теоретски број на парчиња по сценарио

Со цел да се добие нето профитот, се потребно е да се пресмета бруто профитот кој се добива како:

$$P_{b_i} = GP_i \cdot C\check{c}_p \quad (5.43)$$

Каде што:

- P_{b_i} - бруто профит за i -тото сценарио
- GP_i - годишно производство на i -тото сценарио
- $C\check{c}_p$ - пазарна цена на чинење на производот, која се пресметува како:

$$C\check{c}_p = C\check{c} \cdot p \quad (5.44)$$

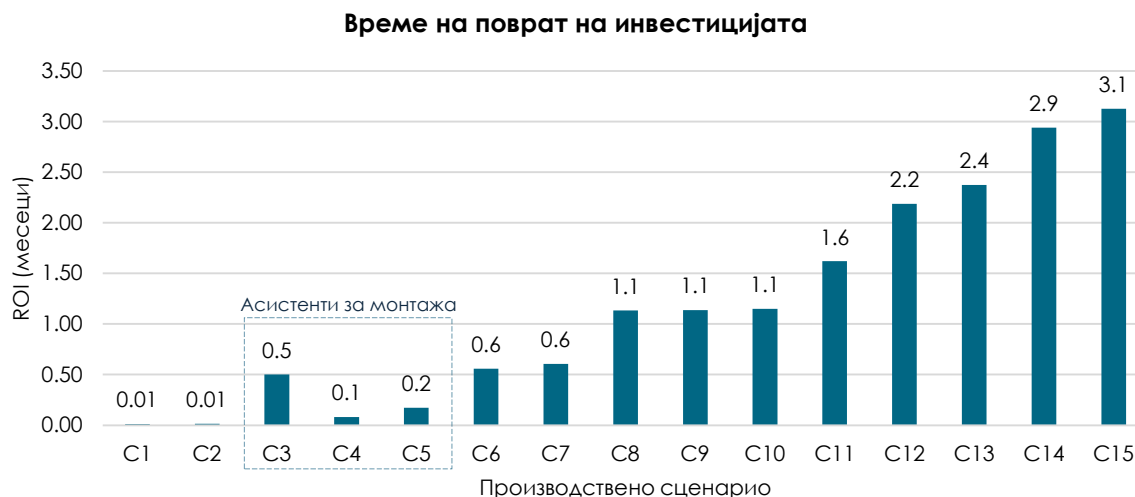
Каде што:

- $C\check{c}$ - цена на чинење на производот
- p - профитна маржа

Нето профитот се добива како:

$$P_{n_i} = P_{b_i} - (C\check{c} \cdot GP_i) \quad (5.45)$$

Во Прилог 8, во збирните резултати, дадени се бруто и нето профитот согласно ваквата пресметка и пресметаниот број на парчиња за сите сценарија. За секое од сценаријата, пресметан е повратот на инвестиција, изразен во месеци поради тоа што цената на чинење на промените во секое од сценаријата е релативно мала во согласност со нето профитот по сценарио, па со цел да се добијат поопiplиви бројки, резултатите се дадени во месеци иако праксата во претпријатијата најчесто е повратот на инвестиција да се претставува во години.



Слика 5.39 Време на поврат на инвестицијата

Дијаграмот на Слика 5.39 го прикажува времето на поврат на инвестицијата по производствени сценарија и покажува јасен тренд на зголемување на периодот на поврат со зголемување на комплексноста и вредноста на инвестицијата. Кај сценаријата C1 и C2, повратот на инвестицијата е исклучително краток и изразен дури во денови, што е директна последица на ниската цена на чинење на применетата опрема, при што и мали подобрувања во процесот резултираат со брз економски ефект.

Од сценарио C12 кон C15, се забележува логично зголемување на времето на поврат на инвестицијата. Ова зголемување не е резултат на намалена ефикасност, туку произлегува од фактот што воведените системи не придонесуваат директно кон зголемување на продуктивноста, туку имаат поддржувачка и овозможувачка улога (мониторинг, визуелизација, дигитална поддршка). Истовремено, тие се карактеризираат со релативно високи инвестициски трошоци поради применетата технологија, што природно го продолжува периодот на поврат. Овој резултат е во согласност со очекувањата за дигитални и напредни технолошки решенија во производните системи.

Интересни резултати се јавуваат кај асистентите за монтажа, каде иако C3 (Smart Рока Јоке) при најголем дел од показателите покажуваше најдобри резултати во поглед на времиња и квалитет, сепак покажува најслаб резултат во поглед на времето на поврат на инвестиција (најдолго време на поврат) во споредба со другите две сценарија за асистенти за монтажа.

5.3.5. Дигитална зрелост

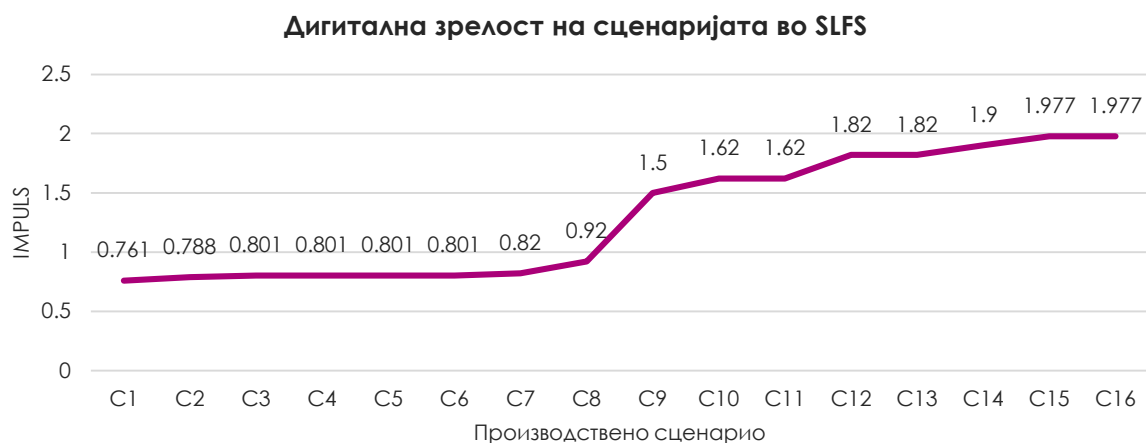
За да се земе во предвид и стратешката димензија при мерењето на показателите, а и според рамката за дигитална трансформација се предвидува проценка на зрелоста на претпријатијата за нивната спремност за дигитална трансформација, искористен ќе биде IMPULS индексот [229].

IMPULS моделот за дигитална зрелост е аплициран на сите сценарија поединечно (притоа истите тука играат улога на производствени претпријатија), при што добиени се резултатите на Слика 5.40. Во овој модел, сценаријата (или во општ случај претпријатијата) се оценуваат во шест димензии:

- Стратегија и организација

- Паметна фабрика
- Паметно производство
- Паметни производи
- Услуги предводени од податоците
- Вработени

Секоја димензија добива ниво на зрелост од 0 (најниско) до 5 (највисоко), како и ниво на зрелост за целото претпријатие.



Слика 5.40 Дигитална зрелост на сценаријата во SLFS според IMPULS

Анализата на дијаграмот покажува постепен раст на дигиталната зрелост низ сценаријата C1-C16. Во првите седум сценарија (C1-C7), кои опфаќаат рачно производство, базично Lean производство и воведување на поедноставени дигитални технологии во монтажа и транспортот, зрелоста останува релативно ниска, со вредности помеѓу 0.76 и 0.82. Значајна промена се забележува од сценариото C8 па натаму, кога автоматизираната контрола на квалитет го започнува подемот на зрелоста, а со автоматизираното палетизирање (C9) и понатамошната дигитална интеграција, кривата расте кон повисоки нивоа, достигнувајќи речиси 2.0 во последните сценарија.

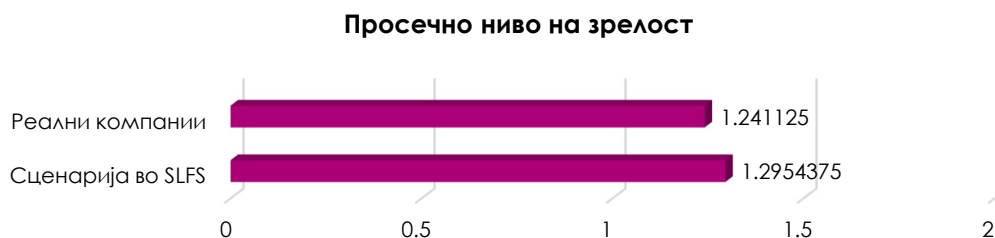
Најголемиот скок се случува во транзицијата од C8 кон C9, каде зрелоста скокнува од 0.92 на 1.5. Овој скок означува премин од поедноставна автоматизација кон автоматизација која инволвира „machine-to-machine“ комуникација (C9 е имплементацијата на SCARA роботот со можноста за комуникација со камерата за контрола на квалитет). Дополнително, од C12 (систем за енергетски менаџмент) па понатаму, зрелоста се стабилизира над 1.8, што е јасен показател дека интегрираните дигитални системи (енергетски менаџмент, ERP, систем за менаџмент со одржување) ја зголемуваат дигиталната зрелост, главно поради тоа што тие инволвираат различни технологии од претходно, вклучувајќи облак технологии, сајбер-безбедност итн.

Овој модел беше искористен и при испитување на зрелоста на македонските производствени претпријатија, во текот на проектот DigiTI-ME, при што моделот на зрелост беше комплетиран од шеснаесет МСП, а резултатите се дадени на Слика 5.41.



Слика 5.41 Дигитална зрелост на македонските МСП според IMPULS

Доколку направиме споредба на просечното ниво на сценаријата во SLFS и реалните МСП во нашата држава, без да навлегуваме премногу во деталите и одговорите, се добиваат резултатите на Слика 5.42.



Слика 5.42 Споредба на зрелоста помеѓу SLFS и македонските МСП

Резултатите укажуваат дека фабриката за учење (SLFS) претставува средина со повисоко ниво на дигитална зрелост во однос на реалните мали и средни претпријатија, што ѝ овозможува да служи како референтен модел за демонстрација и тестирање на понапредни решенија. Истовремено, релативната блискост на индексите сугерира дека дизајнираните сценарија се доволно реалистични и релевантни, односно можат да се поврзат со состојбите во реалниот сектор. Со тоа се потврдува дека резултатите добиени во фабрика за учење имаат практична применливост, особено за компании со слично ниво на зрелост, додека самата фабрика за учење се позиционира како важен катализатор за дигитална трансформација преку демонстрација и трансфер на знаење кон индустријата.

5.4. Анализа на взаемното влијание на показателите

Со цел да се направи анализа за меѓусебното влијание на показателите, истите најпрво се поделени во три групи, дадени во Табела 5.9:

- показатели кои влијаат на состојбата (i-показатели),
- показатели кои ја отсликуваат состојбата (r-показатели), и
- показатели кои се повлијаени од состојбата (b-показатели).

Табела 5.9 Поделба на показателите на групи согласно нивното влијание

Тип на показател	Показател
Влијаат на состојбата	Ниво на прилагодување на промените
	Ниво на проценет когнитивен напор
	Ниво на проценет физички напор
	Ниво на леснотија за користење на решенијата
	Ниво на перцепција за личната продуктивност
	Ниво на вклученост во носење на одлуките
	Стапка на дигитално потпомогнати задачи
	Стапка на дигитално потпомогнати задачи со тежински фактори
	Цена на чинење на имплементацијата на дигитални решенија
Ја отсликуваат состојбата	Време на изработка
	Времетраење на застои
	Стапка на застој во вкупното време на производство
	Време на додадена вредност
	Стапка на време на додадена вредност
	Пропусност
	Добри парчиња
	Количина на шкарт
	Стапка на квалитет
	Број на грешки при изработка
Број на грешки по производ	
Повлијаени се состојбата	Севкупна ефективност на работната сила
	Ниво на мотивација
	Цена на чинење на шкартот
	Цена на чинење на изгубените шанси за производ при застој
	Нето профит
	Време на поврат на инвестицијата
	Индекс за флексибилност
Зрелост на претпријатието	
Годишно производство	

Со оглед на тоа што сите показатели генерално се од интерес на целите на дисертацијата, ќе се селектираат парови на показатели според нивните корелациски коефициенти пресметани според добиените резултати од мерењата, но и според покриеност на сите домени т.е. дигитална култура - дигитална вредност, дигитална вредност - дигитален интензитет и дигитален интензитет - дигитална култура.

Поради големиот број на показатели, потребно е анализата да се фокусира на одредени односи помеѓу показателите, пред се парови на показатели кои се од интерес за Smart Learning Factory - Skorje, но и парови кои имаат изразен меѓусебен ефект кој не е очигледен преку теоретските дефиниции или формули за пресметка на показателите.

Со цел да се најдат корелации изработена корелациска матрица за сите показатели со цел да се стави фокус на статистички значајните корелации. Коефициентот на корелација r пресметан е според Равенка 5.46.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.46)$$

Каде што:

- x_i, y_i - вредности на двете варијабли
- \bar{x}, \bar{y} - средни вредности на варијаблите
- n - број на опсервации
- $r \in [-1, 1]$

Вредноста на коефициентот на корелација ја дава јачината на корелацијата помеѓу двете варијабли (во случајов показатели) кои се разгледуваат. Корелацијата покажува дали и колку силно две променливи се поврзани, без да укажува на насока или влијание. Треба да се напомене дека, корелацијата, за разлика од регресијата не дава колку една променлива влијае врз другата, ниту пак овозможува предвидување.

Во корелација дадени се вредностите и јачините на корелациите согласно вредноста на коефициентот на корелација r [243]. Коефициентот може да има вредности од -1 до 1, притоа кога r е позитивен (+), тоа значи дека двете променливи се движат во иста насока (кога едната расте, расте и другата). Кога r е негативен (-), тоа значи дека променливите се движат во спротивни насоки (кога едната расте, другата опаѓа). При $r = 1$ односно $r = -1$, имаме совршена корелација и променливите се движат во одредените насоки со целосна усогласеност. Тука важно е да се напомене дека други автори даваат различни интерпретации на овој коефициент во поглед на неговото значење.

Табела 5.10 Интерпретација на коефициентите на корелација

Вредност на r	Јачина на корелацијата
0.0 до ± 0.2	Занемарлива
± 0.2 до ± 0.4	Слаба
± 0.4 до ± 0.6	Умерена
± 0.6 до ± 0.8	Силна
± 0.8 до ± 1.0	Многу силна

Корелациска матрица за сите показатели од поглавје 5.4, дадена е во Табела 5.11. Во матрицата со портокалова боја се означени многу силните и силните корелации според Табела 5.10 додека со сина боја слабите и занемарливите. Со сива боја означени се умерените корелации. Во корелациската матрица, дијагоналните вредности (означени со портокалова боја) претставуваат корелацијата на секој показател сам со себе, при што нивната вредност е еднаква на 1. Иако се визуелно издвоени заради комплетност и конзистентност на приказот, тие нема да се разгледуваат како силни корелации.

Табела 5.11 Корелациска матрица за сите показатели

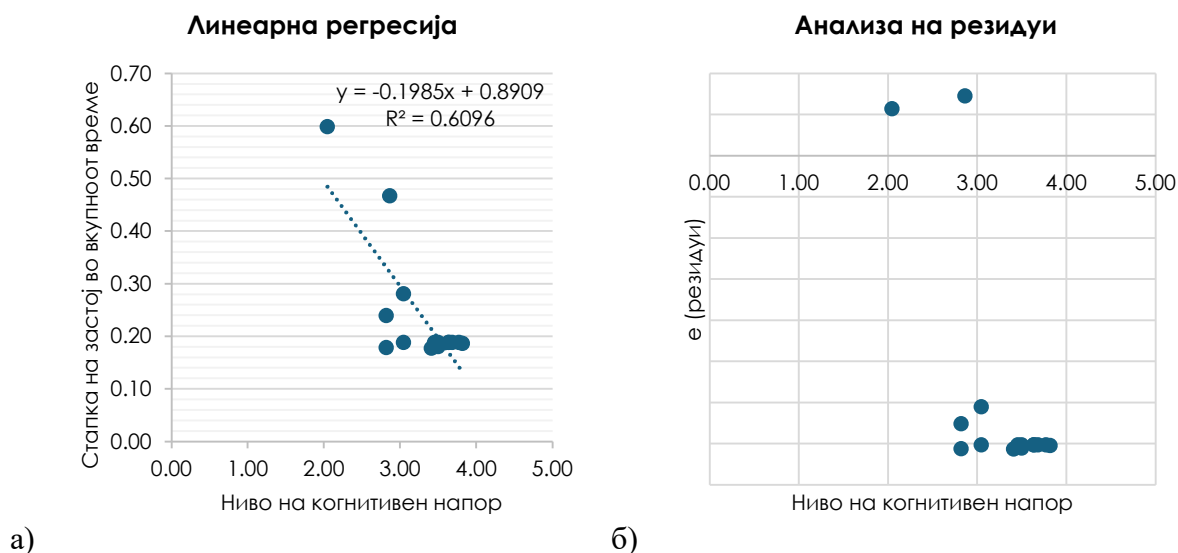
Показател	fi	tz	RZ	tdv	RDV	FI	TR	GQ	SK	QR	GI	GIR	CS	CZ	PP	PMN	PFN	PN	PUF	PLP	PDM	DZR	CCI	GP	PN	ROI	IMPULS	DZTR	OLE	
fi	1.00																													
tz	0.23	1.00																												
RZ	0.28	0.99	1.00																											
tdv	0.41	0.60	0.59	1.00																										
RDV	-0.41	0.43	0.38	0.66	1.00																									
FI	1.00	0.25	0.29	0.40	0.42	1.00																								
TR	0.52	0.37	0.37	0.33	0.11	0.54	1.00																							
GQ	-0.25	0.21	0.27	0.45	0.58	0.26	0.74	1.00																						
SK	0.80	0.28	0.19	0.31	0.22	0.79	0.34	0.04	1.00																					
QR	0.52	0.23	0.19	0.51	0.07	0.50	0.18	0.52	0.87	1.00																				
GI	-0.02	0.83	0.80	0.76	0.78	0.01	0.32	0.34	0.26	0.00	1.00																			
GIR	0.22	0.95	0.96	0.67	0.50	0.23	0.40	0.06	0.12	0.03	0.89	1.00																		
CS	-0.78	0.13	0.05	0.37	0.29	0.76	0.22	0.04	1.00	0.87	0.18	0.00	1.00																	
CZ	0.24	0.89	0.87	0.51	0.33	0.26	0.44	0.13	0.40	0.27	0.77	0.84	0.21	1.00																
PP	0.43	0.15	0.17	0.00	0.36	0.45	0.70	0.30	0.11	0.05	0.00	0.16	0.20	0.20	1.00															
PMN	0.50	0.79	0.78	0.49	0.10	0.51	0.34	0.34	0.13	0.16	0.54	0.68	0.03	0.86	0.01	1.00														
PFN	0.46	0.79	0.79	0.50	0.14	0.47	0.31	0.36	0.07	0.14	0.53	0.69	0.06	0.85	0.01	-0.95	1.00													
PM	0.40	0.80	0.77	0.47	0.16	0.41	0.35	0.25	0.27	0.23	0.58	0.67	0.09	0.85	0.03	0.95	0.91	1.00												
PUF	0.47	0.06	0.09	0.06	0.46	0.49	0.60	0.35	0.22	0.11	0.10	0.08	0.27	0.14	0.94	0.00	0.01	0.04	1.00											
PLP	0.40	0.45	0.46	0.08	0.31	0.40	0.09	0.52	0.37	0.04	0.05	0.31	0.32	0.60	0.16	0.76	0.85	0.76	0.14	1.00										
PDM	0.11	0.50	0.50	0.02	0.13	0.11	0.24	0.46	0.27	0.04	0.16	0.44	0.14	0.55	0.17	-0.54	0.60	0.52	0.04	0.65	1.00									
DZR	0.80	0.56	0.58	0.40	0.25	0.82	0.84	0.35	0.22	0.16	0.32	0.53	0.37	0.63	0.66	0.66	0.61	0.61	0.62	0.27	-0.05	1.00								
CCI	0.73	0.49	0.50	0.36	0.24	0.75	0.78	0.46	0.30	0.15	0.26	0.45	0.36	0.52	0.74	0.51	0.49	0.45	0.59	0.27	0.10	0.92	1.00							
GP	1.00	0.25	0.29	0.40	0.42	1.00	0.54	0.26	0.79	0.50	0.01	0.23	0.76	0.26	0.45	0.51	0.47	0.41	0.49	0.40	-0.11	0.82	0.75	1.00						
PN	1.00	0.25	0.29	0.40	0.42	1.00	0.54	0.26	0.79	0.50	0.01	0.23	0.76	0.26	0.45	0.51	0.47	0.41	0.49	0.40	-0.11	0.82	0.75	1.00	1.00					
ROI	0.73	0.49	0.51	0.36	0.24	0.75	0.78	0.47	0.29	0.15	0.26	0.46	0.35	0.52	0.73	0.51	0.49	0.46	0.59	0.27	0.10	0.92	1.00	0.75	0.75	1.00				
IMPULS	0.06	0.28	0.38	0.13	0.09	0.05	0.01	0.42	0.11	0.08	0.16	0.46	0.10	0.19	0.11	-0.06	0.12	0.04	0.11	0.29	0.54	0.08	0.04	0.05	0.05	-0.04	1.00			
DZTR	0.78	0.61	0.63	0.42	0.22	0.80	0.78	0.38	0.19	0.13	0.36	0.58	0.35	0.67	0.65	0.68	0.65	0.62	0.58	0.36	-0.10	0.98	0.95	0.80	0.80	0.95	-0.12	1.00		
OLE	0.29	0.63	0.60	0.16	0.11	0.27	0.03	0.53	0.78	0.90	0.35	0.46	0.73	0.61	0.04	0.48	0.46	0.53	0.04	0.13	-0.23	0.14	0.11	0.27	0.27	0.12	-0.23	-0.8	1.00	

Дигитална култура - дигитална вредност

Првата дискусија за взаемното влијание на показателите се фокусира на испитување на поврзаноста помеѓу дигиталната култура и дигитална вредност во производниот процес при различните сценарија за производство со различни нивоа на дигитализација. Дигиталната култура, како субјективна димензија, ги опфаќа знаењата, ставовите, мотивацијата, подготвеноста за промени и слично. Од друга страна, дигиталната вредност се манифестира преку мерливи оперативни ефекти, како што се времето, квалитетот, флексибилноста и трошоците. Во овој контекст, прашањето кое треба да се дискутира, се поставува како - **во кој степен показателите на дигитална култура се поврзани со оперативните показатели на дигитална вредност во производниот процес?** Анализата на оваа релација овозможува да се процени дали и како човечката и организациската подготвеност за ДТ се одразува врз конкретните производствени перформанси.

Времето на изработка како еден од најважните показатели во димензијата вредност има највисок коефициент на корелација со Нивото на проценет когнитивен напор и истиот има умерена вредност според Слика 5.44, односно $r = -0,50$. Ова значи дека со зголемување на проценетиот когнитивен напор, Времето на изработка има тенденција да се намалува, односно операторите во услови на повисока когнитивна ангажираност постигнуваат пониско време на извршување на задачите. Умерената вредност на коефициентот ($|r| = 0,50$) укажува дека врска е релевантна, но не и доминантна, што имплицира дека Времето на изработка не е исклучиво објаснето преку менталниот напор, туку зависи и од други фактори.

Од корелационската матрица, високи коефициенти на корелација се забележуваат кај Стапката на застој во вкупното време на производство и Нивоата на ментален и физички напор. На дијаграмите на Слика 5.43, прикажана е линеарна регресија за Нивото на когнитивен напор и Стапката на застој во вкупното време на производство.



Слика 5.43 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за NM и RZ

Линеарната регресија укажува на негативна врска помеѓу нивото на когнитивен напор и стапката на застој во вкупното време, што значи дека со зголемување на менталниот напор се забележува тенденција на намалување на застојот. Негативниот наклон на регресионата линија ($\beta = -0,1985$) укажува дека поголемата когнитивна ангажираност на извршителите е поврзана со поефикасно искористување на времето во

процесот. Вредноста на коефициентот на детерминација ($R^2 = 0,6096$) покажува дека приближно 61% од варијацијата на стапката на застој во вкупното време може да се објасни преку нивото на когнитивен напор на извршителот. Резултатот покажува дека нивото на когнитивен напор делумно ја објаснува промената на стапката на застои, и покрај тоа што станува збор за субјективен показател. Дијаграмот на резидуите не покажува јасна систематска шема, како што се тренд, кривина или конусна форма.

Од практичен аспект, добиените резултати сугерираат дека поголемата когнитивна ангажираност (што во реалноста би се интерпретирано и како зголемен ментален замор) на извршителите не мора задолжително да води кон зголемени застои, туку напротив, може да биде поврзана со поефикасно управување со времето. Ова укажува дека дигиталните решенија кои го зголемуваат менталниот напор/замор на извршителите можат индиректно да придонесат кон намалување на застојот во процесот.

Понатаму, и покрај релативно високата корелација помеѓу Нивото на физички напор и Стапката на застој, сепак регресионата линија укажува на слаба позитивна врска помеѓу овие показатели. Позитивниот наклон ($\beta = 8,17$) сугерира дека со зголемување на физичкиот напор постои тенденција за зголемување на застојот, статистички оваа зависност е многу слабо изразена. Вредноста на коефициентот на детерминација е $R^2 = 0,0759$, што значи дека само околу 7,6% од варијацијата на стапката на застој може да се објасни преку физичкиот напор. Дијаграмот е прикажан во Прилог 9.

Од тука може да се заклучи дека на стапката на застој во производството, сепак поголемо влијание има менталниот напор што може да се поврзе со посложени упатства, помалку обука итн.

Други парови на показатели кои може да се анализираат согласно нивните корелации се:

- Ниво на мотивација - стапка на грешки по производ
- Ниво на когнитивен напор - стапка на грешки по производ
- Ниво на физички напор - стапка на грешки по производ

Поврзани со квалитет исто така може да се разгледа:

- Ниво на прилагодување на промените - пропусност
- Ниво на леснотија на користење на решенијата - пропусност

Стапката на квалитет има највисок коефициент на корелација со Нивото на мотивација, но истиот е занемарлив ($r = 0,23$). Севкупната ефективност на работната сила има највисок коефициент со Ниво на проценет когнитивен напор, Ниво на проценет физички напор и Ниво на мотивација, но сепак истиот е повторно занемарлив ($r < 0.5$).

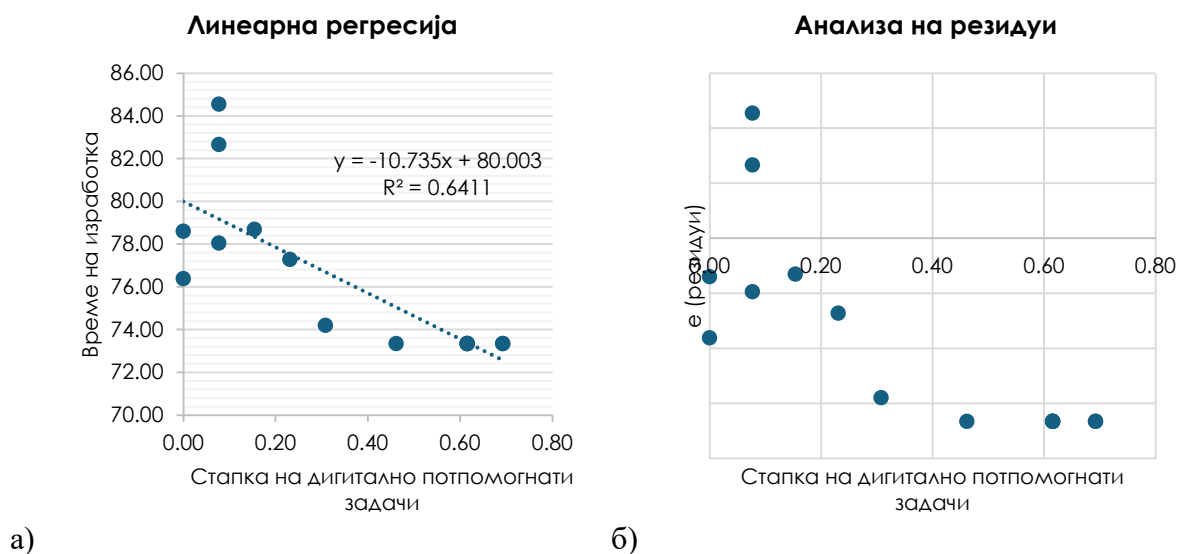
Дигитална вредност - дигитален интензитет

Втората дискусија ја разгледува врската помеѓу остварената дигитална вредност и нивото на дигитален интензитет во процесот. Дигиталниот интензитет ја претставува застапеноста, разновидноста и инвестициите за имплементација на дигиталните технологии во процесите, додека дигиталната вредност ја прикажува нивната оперативна ефективност. Прашањето кое треба да го одговори оваа дискусија е: **дали и во кој степен дигиталната вредност е поврзана со нивото на дигитален интензитет во производниот процес?** Преку анализа на оваа релација се испитува дали повисокото

ниво на технолошка интеграција во процесите е асоцирано со подобри оперативни перформанси.

При анализата, фокус ќе биде ставен на независните променливи Стапката на дигитално потпомогнати задачи (DZR) и Стапката на дигитално потпомогнати задачи со тежински фактори (DZTR).

Анализата започнува со анализа на поврзаноста на **Стапката на дигитално потпомогнати задачи (DZR)** и **Времето на изработка (t_i)**, кои во Слика 5.44, покажуваат висок коефициент на корелација ($r=0.80$). На Слика 5.46 дадена е линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за овие два показатели.



Слика 5.44 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за DZR и t_i

Линеарната регресија укажува на јасно изразена негативна врска помеѓу стапката на дигитално потпомогнати задачи и Времето на изработка. Негативниот наклон на регресионата линија ($\beta = -10,735$) покажува дека со зголемување на уделот на дигитално поддржани активности, Времето на изработка на извршување се намалува, што укажува на подобрување на ефикасноста на процесот. Вредноста на коефициентот на детерминација ($R^2 = 0,6411$) покажува дека околу 64% од варијацијата на Времето на изработка може да се објасни преку стапката на дигитално потпомогнати задачи. Ова има висока значајност, посебно при линеарен модел во ваков тип на применето истражување. Дијаграмот на резидуи не покажува јасна систематска шема, како што се кривини или трендови, што укажува дека претпоставката за линеарност е задоволена.

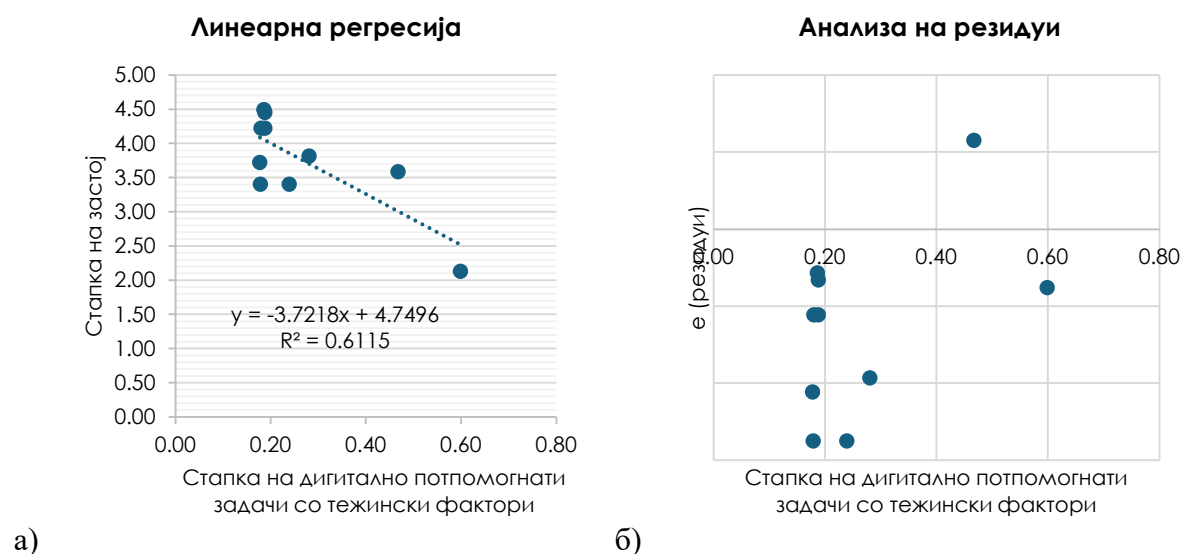
Од практичен аспект, резултатите јасно укажуваат дека зголемувањето на уделот на дигитално потпомогнати задачи е поврзано со значително намалување на времето на извршување. Ова дава силна поддршка за постепена и фазна имплементација на дигитални решенија, особено во процеси каде времето претставува критичен показател на дигитална вредност. Истовремено, резултатите сугерираат дека дури и делумна дигитална поддршка (дискутирано и претходно при анализа на поединечните показатели) може да донесе мерливи подобрувања во перформансите.

Со овој линеарен модел може да се изврши приближно предвидување на Времето на изработка за различни нивоа на дигитално потпомогнати задачи, кое може да се користи за ориентациона проценка на ефектите врз времињата од зголемување на дигиталната

подршка во процесот или подршка при донесување одлуки за приоритизација на дигитални интервенции во производниот процес.

Висок коефициент на корелација постои и помеѓу Стапката на дигитално потпомогнати задачи и Пропусност ($r = -0.84$) и помеѓу Стапка на дигитално потпомогнати задачи и Индекс за флексибилност ($r=0.82$), но овие регресији не се дополнително анализирани во текстуалниот дел поради тоа што пред сè показателите Пропусност и Флексибилност се изведени од показателот Време на изработка и со тоа се очекува истите да имаат слично влијание.

Висок коефициент на корелација се забележува и при споредба на Стапка на дигитално потпомогнати задачи со тежински фактори и Стапка на застој ($r = -0.63$). На Слика 5.45 дадена е линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за овие два показатели.

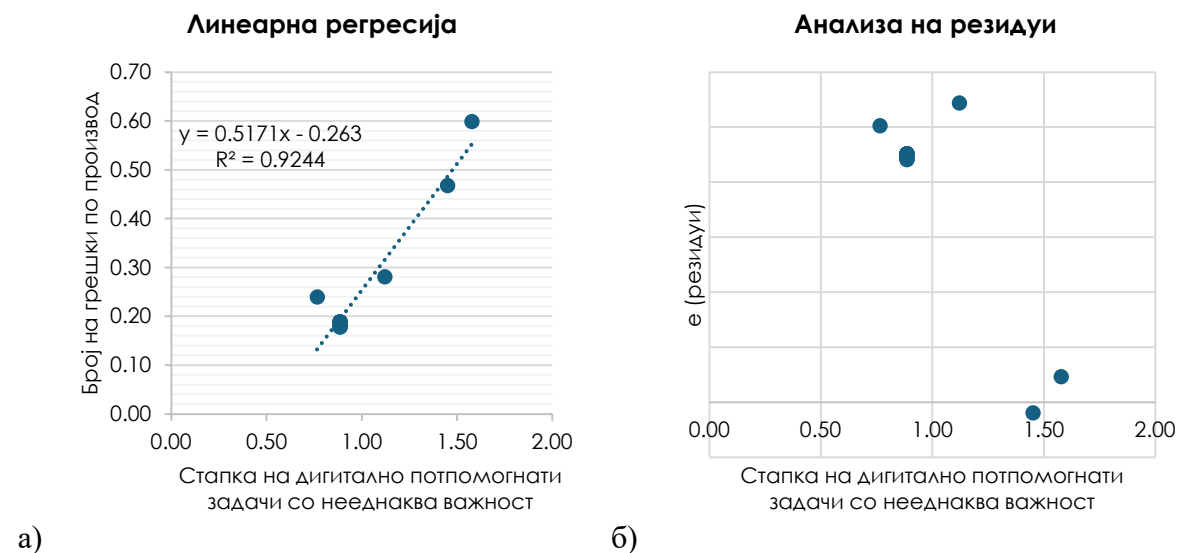


Слика 5.45 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за DZR и RZ

Линеарната регресија укажува на изразена негативна врска помеѓу стапката на дигитално потпомогнати задачи со технички фактори и стапката на застој. Негативниот наклон на регресионата линија ($\beta = -3,7218$) покажува дека со зголемување на уделот на дигитална подршка во техничките активности, застојот во процесот има тенденција да се намалува, што укажува на подобрување на процесната стабилност. Коефициентот на детерминација ($R^2 = 0,6115$) покажува дека приближно 61% од варијацијата на стапката на застој може да се објасни преку стапката на дигитално потпомогнати задачи со технички фактори. Ова претставува релативно високо објаснување на зависниот показател преку независниот, што е значајно со оглед на комплексноста на производните процеси. Дијаграмот на резидуи не покажува изразена систематска шема или тренд, што укажува дека претпоставката за линеарност е генерално задоволена. Се забележува една точка (Слика 5.46, под б) со поголемо позитивно отстапување, која може да се смета за потенцијално влијателна. Сепак, нејзиното присуство не ја менува значително насоката на регресионата линија, што укажува дека моделот е релативно стабилен и дека сите набљудувања може оправдано да се задржат во анализата.

Од практичен аспект, резултатите сугерираат дека зголемувањето на дигиталната подршка кај техничките активности е поврзано со значително намалување на застојот во процесот.

Поврзано со квалитетот на изведувањето на процесот, релативно висока корелација има помеѓу Стапка на дигитално потпомогнати задачи со тежински фактори и Број на грешки по производ. На Слика 5.46 дадена е линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за овие два показатели.

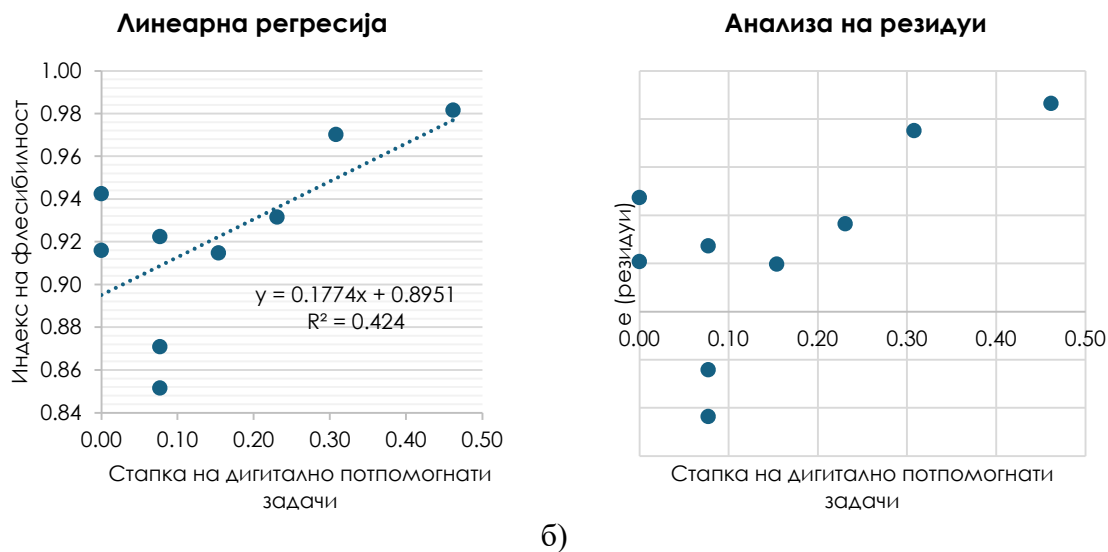


Слика 5.46 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за DZR и GIR

На дијаграмите се забележува силна позитивна линеарна врска помеѓу стапката на дигитално потпомогнати задачи со средна сложеност и бројот на грешки во процесот. Високата вредност на коефициентот на детерминација ($R^2 = 0,9244$) укажува дека моделот објаснува **92% од варијацијата** на зависната променлива во рамките на анализираниот примерок, што ја потврдува силната поврзаност помеѓу разгледуваните показатели, без да се имплицира општа применливост надвор од конкретните услови. Ова една од највисоките зависности на два показатели измерени и пресметани во склоп на дисертацијата.

Значајни коефициенти на корелација има помеѓу показателите Инвестиција - Време на изработка ($r=-0.73$) и Поврат на инвестиција - Пропусност (-0.73). Но овие парови нема да бидат текстуално разгледувани поради тоа што, според очекувањата, а и според пресметките има релативно слични резултати како и кај Стапката на дигитално потпомогнати задачи - Времето на изработка поради поврзаноста на секундарните показатели од кои се пресметуваат големините. Поврат на инвестиција (ROI), како еден од поважните показатели за дигитален интензитет, покажува високи корелации со сите показатели од дигитална вредност кои се поврзани со времето, што е и логично поради начинот на добивање на показателот, објаснето претходно.

За крај ќе се разгледа поврзаноста помеѓу Стапката на дигитално потпомогнати задачи и Индексот за флексибилност. На Слика 5.49 дадена е линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за овие два показатели.



Слика 5.47 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за RDZ и FI

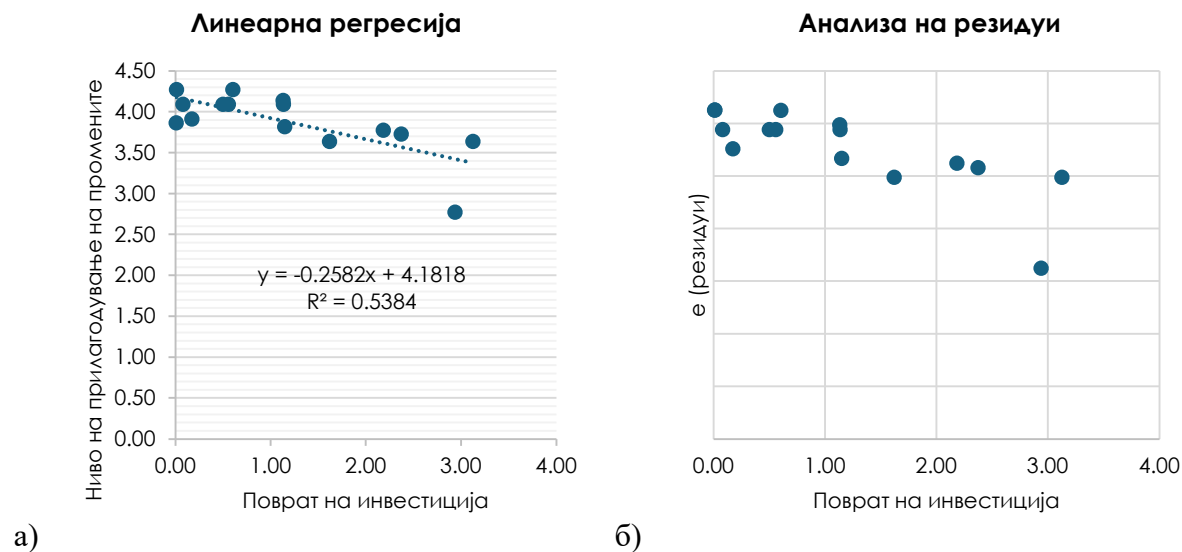
Регресијата покажува позитивна линеарна врска помеѓу стапката на дигитално потпомогнати задачи и индексот на флексибилност ($\beta = 0.1774$), при што моделот објаснува околу 42.4% од варијацијата ($R^2 = 0.424$). Ова укажува дека зголемувањето на дигиталната поддршка во задачите е поврзано со умерено зголемување на флексибилноста на процесот. Анализата на резидуи не укажува на изразена систематска отстапка.

Дигитален интензитет - дигитална култура

Во третата дискусија сеа анализира поврзаноста помеѓу дигиталниот интензитет и дигиталната култура, со цел да се испита меѓусебната интеракција помеѓу технолошката и човечката димензија на дигиталната трансформација. Додека дигиталниот интензитет го одразува степенот на имплементација на дигитални решенија во процесот, дигиталната култура ја претставува подготвеноста на вработените да ги прифатат и ефективно да ги користат тие решенија. Дискусијата е потребно да одговори на прашањето: дали и во кој степен нивото на дигитален интензитет е поврзано со показателите на дигитална култура кај вработените.

Првата корелација која ќе биде разгледана е Нивото на прилагодување на промените и Времето на поврат на инвестиција ($r = -0.73$), односно Висината на инвестицијата ($r = -0.74$). На Слика 5.48 дадена е линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за овие два показатели.

Линеарната регресија укажува на умерена негативна врска помеѓу повратот на инвестиција и нивото на вклученост во одлуките. Негативниот наклон ($\beta = -0.2582$) сугерира дека со зголемување на ROI се забележува тенденција на благо намалување на вклученоста, при што врската не е силно изразена. Коефициентот на детерминација ($R^2 = 0.5384$) покажува дека нешто повеќе од половина од варијацијата на нивото на вклученост може да се објасни преку повратот на инвестиција во рамките на анализираниот примерок. Ова укажува дека моделот објаснува околу 54% варијацијата на повратот на инвестиција.

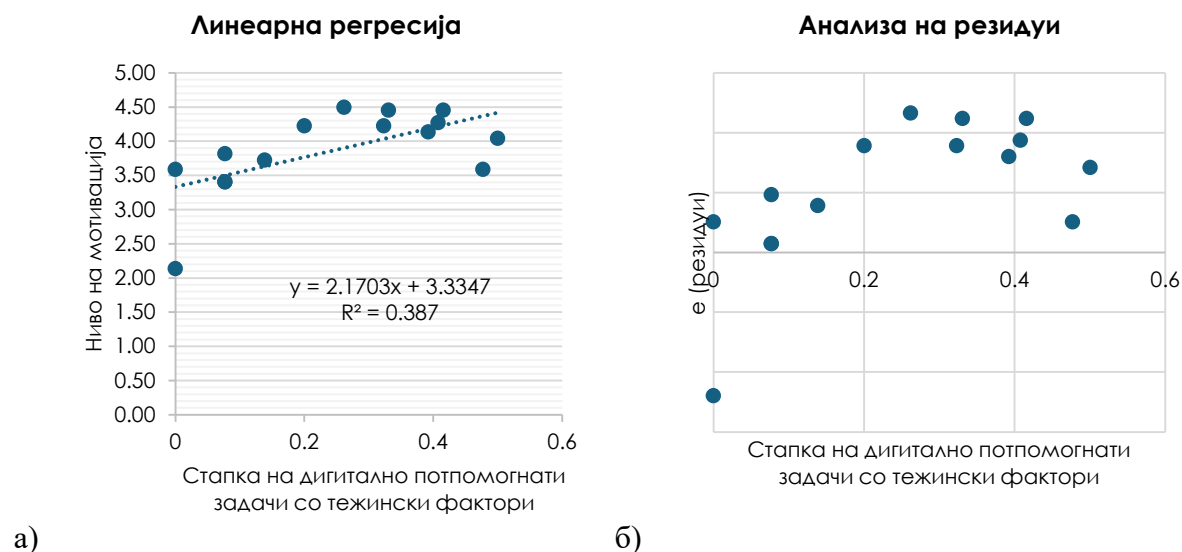


Слика 5.48 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за ROI и PP

Дијаграмот на резидуи не покажува изразена систематска шема, што сугерира дека претпоставката за линеарност е прифатлива. Сепак, резидуите се нешто повеќе дисперзирани кај повисоки вредности на ROI, што може да укажува на блага нерамномерност во варијансата. Се забележува една точка со поголемо негативно отстапување при повисока вредност на ROI, која може да се смета за потенцијално влијателна. Сепак, таа не ја нарушува значително насоката на регресионата линија, па моделот може да се смета за релативно стабилен.

Овој модел може да се користи за ориентациона анализа на односот помеѓу економските ефекти од инвестициите и управувањето со промените при нивната имплементација, при што резултатите имаат индикативен карактер и не се наменети за директно оперативно планирање.

Понатаму, се анализираат Стапка на дигитално потпомогнати задачи со тежински фактори и Ниво на мотивација, со коефициент на корелација $r=0,62$. На Слика 5.49 дадена е линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за овие два показатели.

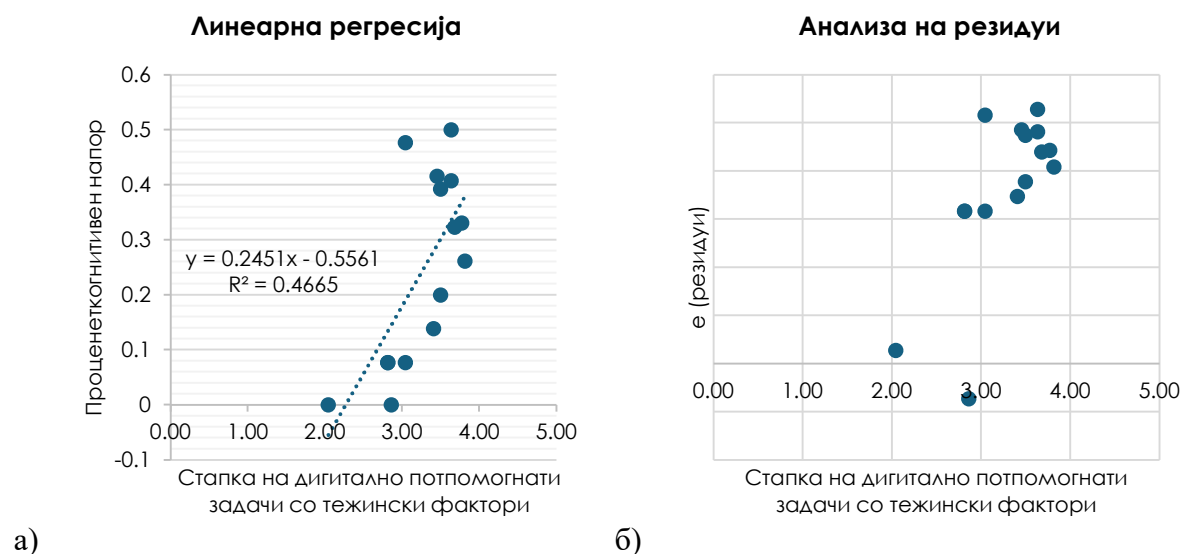


Слика 5.49 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за DZTR и PM

Линеарната регресија укажува на позитивна, но слабо до умерено изразена врска помеѓу стапката на дигитално потпомогнати задачи со технички фактори и нивото на мотивација. Позитивниот наклон ($\beta = 2,1703$) сугерира дека зголемувањето на дигиталната поддршка е асоцирано со повисоко ниво на мотивација, иако јачината на врска не е доминантна. Вредноста на коефициентот на детерминација ($R^2 = 0,387$) укажува дека околу 39% од варијацијата на нивото на мотивација е поврзана со стапката на дигитално потпомогнати задачи со технички фактори, додека преостанатиот дел е условен од други организациски, технолошки и човечки фактори кои не се опфатени со моделот. Дијаграмот на резидуи не покажува изразена систематска шема или тренд, што укажува дека претпоставката за линеарност е прифатлива.

Од практичен аспект, моделот укажува дека повисокото ниво на техничка дигитална поддршка е поврзано со повисоко ниво на мотивација на вработените, при што сценаријата со поголем степен на имплементација на дигитални решенија покажуваат поповолни мотивациски нивоа на извршителите. Сепак, добиените резултати имаат индикативен карактер и не се наменети за директно предвидување или поединечно управување со човечки ресурси, посебно поради ограничувањето дека независниот показател е субјективно измерен.

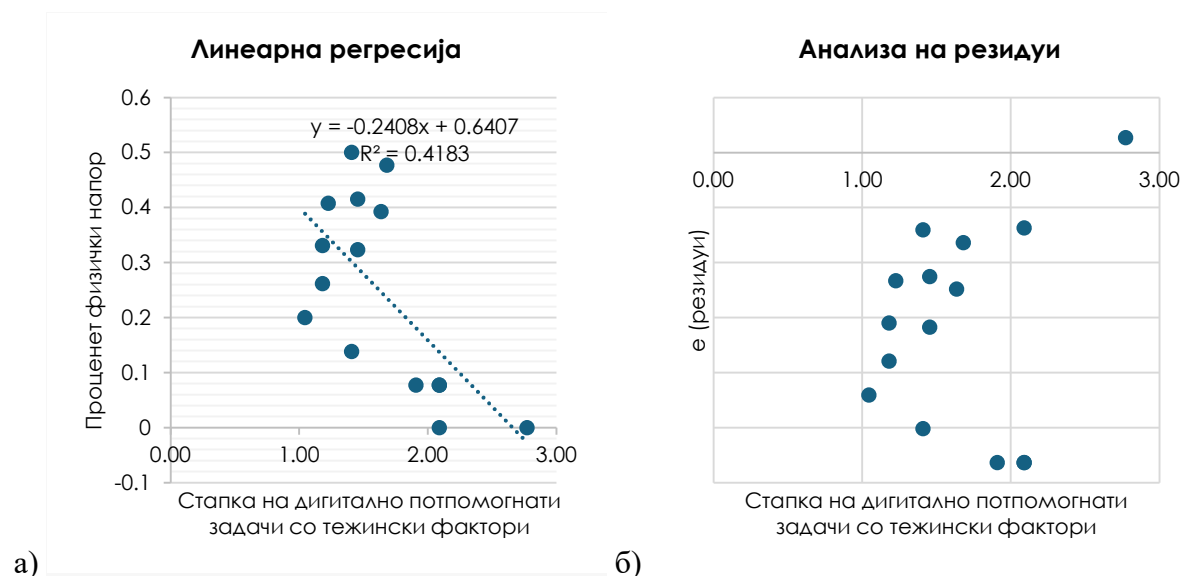
Стапката на дигитално потпомогнати задачи со тежински фактори има исто така релативно високи коефициенти на корелација и со нивоата на проценет когнитивен и физички напор $r=0,68$ и $r=-0,65$, респективно. На Слика 5.50 дадена е линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за првиот пар на показатели.



Слика 5.50 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за DZR и PMN

На дијаграмот под а) се забележува позитивна, умерено изразена врска помеѓу стапката на дигитално потпомогнати задачи со технички фактори и проценетиот когнитивен напор. Вредноста $R^2 = 0,4665$ укажува дека околу 47% од варијацијата на менталниот напор е поврзана со нивото на дигитална поддршка, додека преостанатиот дел е условен од други технолошки и организациски фактори. Анализата на резидуите не покажува јасна систематска шема, што значи дека линеарниот модел е прифатлив. Од практичен аспект, моделот може да се користи за ориентациона проценка на трендот дека зголемувањето на техничката дигитална поддршка е асоцирано со повисок когнитивен напор.

На Слика 5.51 дадена е линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за Стапка на дигитално потпомогнати задачи со тежински фактори и Процент когнитивен напор.



Слика 5.51 Линеарна регресија (а) и анализа на резидуи (б) за DZTI и PFN

На Слика 5.51 под а), за разлика од Слика 5.51 под а), се забележува помала и спротивна (негативна) поврзаност помеѓу стапката на дигитално потпомогнати задачи со технички фактори и проценетиот физички напор, при што околу 42% од варијацијата е поврзана со анализираната променлива. Во споредба со претходниот модел за когнитивен напор, врската е послаба и со обратна насока, што укажува дека техничката дигитална поддршка има поизразен ефект врз когнитивниот отколку врз физичкиот аспект на оптоварување.

5.5. Согледувања и заклучоци

Согледувањата на ова поглавје ќе бидат направени од три аспекти:

- Улога на фабриката за учење во ваков тип на истражување
- Коментар за резултатите и предлог за модел на зрелост според измерените димензии,
- Поврзаност на рамката за дигитална трансформација со мерењата и студиите на случаи, и
- Критика за стандардот ISO 22400

На Слика 5.52 визуелизирана улогата на фабриката за учење во рамки на истражувањето. Во реални индустриски услови, имплементацијата на дигиталните иницијативи би подразбирала паралелно спроведување на активности како проектирање, набавка и физичка интеграција на решенијата во текот на самото истражување, што од аспект на време и финансиски ресурси претставува значително ограничување и во најголем дел нереалистичен пристап за академски труд. Во таа насока, фабриката за учење се јавува како клучна експериментална платформа, чија основна улога е да овозможи реконфигурација на веќе постоечки системи и технологии со цел генерирање на различни производствени контексти. Преку ваквиот пристап се постигнува значително скратување на времето и намалување на финансиските трошоци за имплементација, при што истовремено се задржува можноста за физичко тестирање и евалуација на учинокот од дигиталната трансформација.

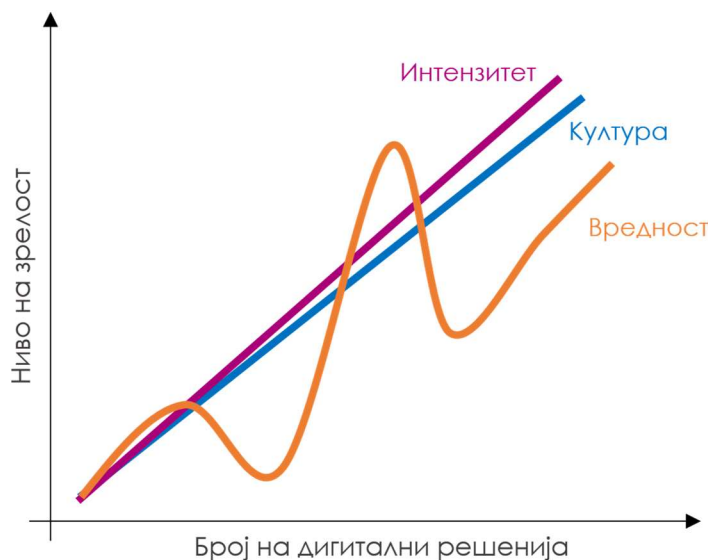


Слика 5.52. Улога на фабриката за учење во истражувањето

Во ова поглавје се презентирани резултатите од експерименталното истражување спроведено преку изведување на претходно дефинираните производствени сценарија. Најпрво се прикажани и анализирани показателите за дигитална вредност, кои ги опфаќаат димензиите време, квалитет, трошоци и флексибилност. Потоа анализирани резултатите за показателите за дигитална култура и дигитален интензитет, врз основа на кои се пресметува и нивото на дигитална зрелост. Во завршниот дел од поглавјето е извршена анализа на меѓусебното влијание помеѓу трите клучни димензии (дигитална култура, дигитална вредност и дигитален интензитет).

Со ваквиот пристап се овозможува согледување на кумулативното влијание од постепената имплементација на дигитални решенија во еден ист производствен процес во фабрика за учење. Понатаму, секој показател се анализира преку неговата дефиниција, начин на пресметка и примена во истражувањето, при што се презентираат резултатите, кратка дискусија и релевантни ограничувања.

Пред почетокот на експериментите, очекувањата за менувањето на показателите беа согласно Слика 5.53.



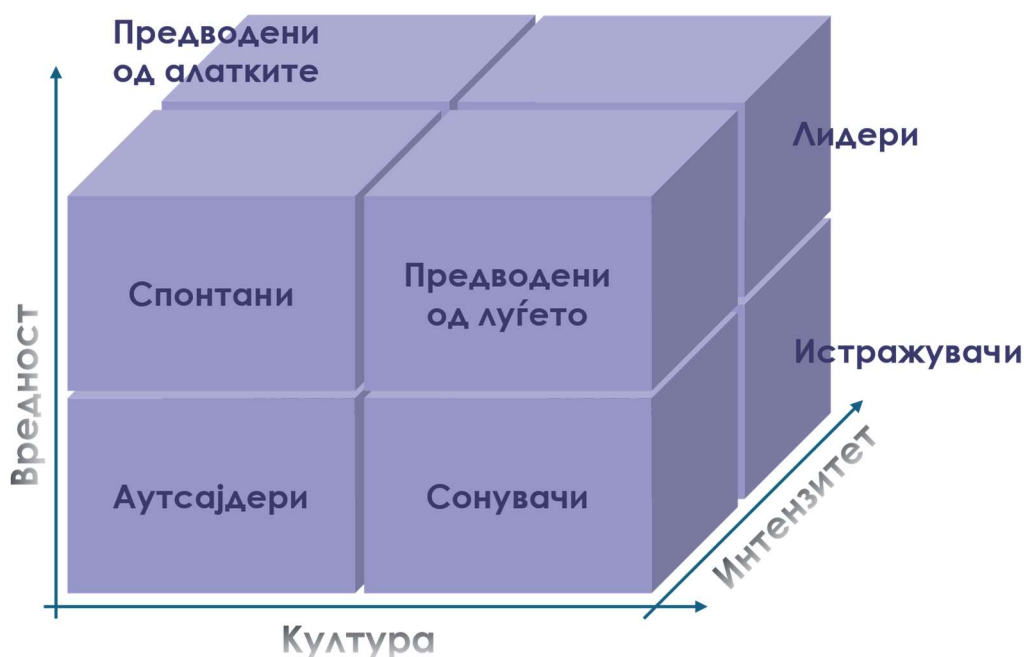
Слика 5.53 Очекувани резултати

Сепак оваа проекција само делумно се оствари. Дигиталниот интензитет и дигиталната вредност дефинитивно ги следеа кривите според сликата при зголемување на бројот на дигиталните решенија, но кривата на показателите за дигитална култура сепак повеќе наликува на кривата на дигитална вредност отколку на дигитален интензитет, како што се очекуваше.

Поради големиот број на показатели, анализата се фокусира на селектирани парови на показатели кои ги поврзуваат трите клучни домени: дигитална култура, дигитална вредност и дигитален интензитет. Со цел да се идентификуваат најрелевантните взаемни влијанија, изработена е корелациска матрица со сите показатели, врз основа на која понатамошната анализа се насочува кон статистички значајните и најсилни корелации. На овој начин се овозможува подлабоко разбирање на меѓусебните релации помеѓу показателите кои се од најголем интерес за целите на дисертацијата и примената во SLFS. Анализата на корелациите покажува дека **најголем број силни и многу силни врски се јавуваат помеѓу показателите од димензиите дигитална вредност и дигитален интензитет**. Ова укажува дека зголемувањето на нивото на имплементација на дигиталните технологии има директна и изразена поврзаност со подобрувањето на производствените перформанси. Од друга страна, корелациите помеѓу дигиталната култура и останатите димензии се присутни, но во помал обем, што укажува дека нејзиното влијание е индиректно и се манифестира постепено преку подолгорочни организациски промени.

Потенцијал за креирање на нов модел на зрелост според учинокот

Ова истражување не опфаќа создавање на сеопфатни показатели за дигитална вредност, култура и интензитет кои понатаму би можеле да се користат за споредба на претпријатијата, но трендовите во сите три димензии би можело квалитативно да се карактеризираат со помош на тридимензионален модел за зрелост, според предлогот на Слика 5.54.



Слика 5.54. Предложен модел на зрелост

Она што е интересно во овој модел на зрелост е неговата тродимензионалност, односно нивото на кое се наоѓа едно претпријатие зависи од неговите резултати според три критериуми (столбовите за мерење на дигиталната трансформација):

- Аутсајдери („Outsiders“) - ниска култура, низок интензитет, ниска вредност
- Ентузијастички („Tech-pushers“) - ниска култура, висок интензитет, ниска вредност

- Сонувачи („Dreamers“) - висока култура, низок интензитет, ниска вредност
- Истражувачи („Experimenters“) - висока култура, висок интензитет, ниска вредност
- Спонтани („Accidental performers“) - ниска култура, низок интензитет, висока вредност
- Предводени од алатките („Tool-driven“) - ниска култура, висок интензитет, висока вредност
- Предводени од луѓето („People-driven“) - висока култура, низок интензитет, висока вредност
- Лидери („Leaders“) - висока култура, висок интензитет, висока вредност

Критика кон ИСО стандардот за мерење на показатели

Иако стандардот ISO 22400 претставува значаен чекор кон стандардизација на показателите за управување со производствените операции, неговата примена има одредени ограничувања. Стандардот е првенствено ориентиран кон оперативните и техничките перформанси на производните системи, како што се ефикасност, време и искористеност на ресурсите, при што не се посветува внимание на организациските и културните аспекти кои се клучни во процесите на дигитална трансформација. За време на неговата имплементација во рамки на ова истражување се појавија и практични проблеми во однос на неговата применливост. Имено, значителен дел од предложените показатели се покажаа како потешко применливи во лабораториска средина, додека голем број од нив се однесуваат на планирани показатели, кои не беа опфатени со ова истражување и затоа не беа усвоени во предложениот систем за мерење. Дополнително, кај одредени показатели се јавуваат и терминолошки предизвици, особено во однос на нивниот прецизен превод на македонски јазик, што дополнително ја усложнува нивната директна примена и интерпретација во локалниот контекст. Поради тоа, иако стандардот претставува корисна основа за мерење на производните перформанси, неговата примена во контекст на дигиталната трансформација бара дополнување со показатели кои ги опфаќаат и организациските, културните и стратешките аспекти на трансформацијата.

Во врска со примената на стандардот сепак најголемата критика се упатува кон големата застапеност на показатели кои се однесуваат на машини и производни ќелии, а многу помалку на основа на луѓето или нивните работни места. Во оваа насока, во истражувањето предложени беа неколку показатели за кои авторот смета дека потенцијално би требало да се вклучат во следните ревизии на стандардот со цел истиот да биде поедноставен за корисници, посебно претпријатија со ниска (Lean и дигитална) зрелост. Од ваквите показатели може да се издвојат севкупната ефективност на работната сила и индексот за флексибилност.

Во **Табела 5.12** даден е показателот севкупна ефикасност на работната сила претставен на идентичен начин како показателите во стандардот.

Табела 5.12 Севкупна ефикасност на работната сила - дефинирање и пресметка

Име на показател	Севкупна ефикасност на работната сила (OLE)
Опис	Севкупната ефикасност на работната сила (OLE) претставува агрегатен показател кој ги интегрира достапноста, перформансите и квалитетот на извршените работни задачи со цел да се процени ефективноста на човечкиот труд во производствени системи.
Придобивки / Примена	Показателот овозможува структурирана анализа на продуктивноста на работната сила и идентификација на загуби поврзани со застои, намалени перформанси и квалитет. Се користи за споредба на различни производствени сценарија, следење на ефектите од дигитални технологии и поддршка на континуирано подобрување.

Име на показател	Севкупна ефикасност на работната сила (OLE)
Временско однесување	Периодично, по потреба, off-line анализа
Дефиниција и пресметка	OLE претставува производ од достапноста, перформансите и стапката на квалитет на работната сила.
Формула:	$OLE_i = D_i \cdot P_i \cdot QR_i$
Единица / Димензија:	%
Опсег / Оценка:	Min: 0% Max: 100% Тренд: колку е поголема вредноста, толку е подобро
Анализа	Поврзано со извршител, работна станица, производствено сценарио или процес
Забелешки	Показателот е адаптација на концептот OEE за човечки труд и е особено применлив во процеси каде операторот претставува клучен носител на перформансите.
Белешки / Објаснување:	Достапноста ја претставува ефективната искористеност на времето на извршителот, перформансите ја споредуваат реалната и теоретската продуктивност, додека квалитетот ја претставува стапката на добри производи.
Ниво на примена:	Оперативно, менаџерско, стратешко

Во Табела 5.13 даден е показателот индекс за флексибилност претставен на идентичен начин како показателите во стандардот.

Табела 5.13 Индекс за флексибилност - дефинирање и пресметка

Име на показател	Индекс на флексибилност (FI)
Опис:	Индексот на флексибилност претставува показател кој ја оценува способноста на производствениот систем да одговори во рамки на поставени или дозволени граници на одреден показател.
Придобивки / Примена	Показателот овозможува проценка на степенот на флексибилност на производствениот процес во однос на поставените барања, како што се време на изработка, застои, квалитет или производствен капацитет. Се користи за споредба на сценарија, идентификација на критични процеси и поддршка на процесно подобрување.
Временско однесување	Периодично, по потреба, off-line анализа
Дефиниција и пресметка	Индексот претставува однос помеѓу дозволената (референтна) и реално измерената вредност на анализираниот показател.
Формула	$FI_i = \frac{\text{дозволена вредност на показателот}}{\text{измерена вредност на показателот}}$
Единица / Димензија	Без димензија
Опсег / Оценка	(FI < 1) - измерената вредност е поголема од дозволената (FI = 1) - процесот работи на минимално потребното ниво (FI > 1) - процесот има резервна флексибилност Тренд: колку е поголема вредноста, толку е подобро
Анализа	Поврзано со производствен процес, сценарио, извршител или производствена линија
Забелешки	Показателот може да се примени на различни производствени KPI показатели, како време на изработка, застои, квалитет или производствен капацитет.
Објаснување	Во контекст на време на изработка, дозволената вредност најчесто се дефинира преку тактно време. Вредности блиски до 1 укажуваат на гранична состојба каде дури и мали нарушувања може да предизвикаат негативни ефекти врз производството.
Ниво на примена	Оперативно, менаџерско, стратешко

Како критика може да се напомене и тоа што нема соодветна верификација и практична примена на стандардот во прегледаната литература, што од друга страна е и предност за ова истражување, правејќи го едно од првите кои го разгледуваат стандардот и применуваат на ваков начин.

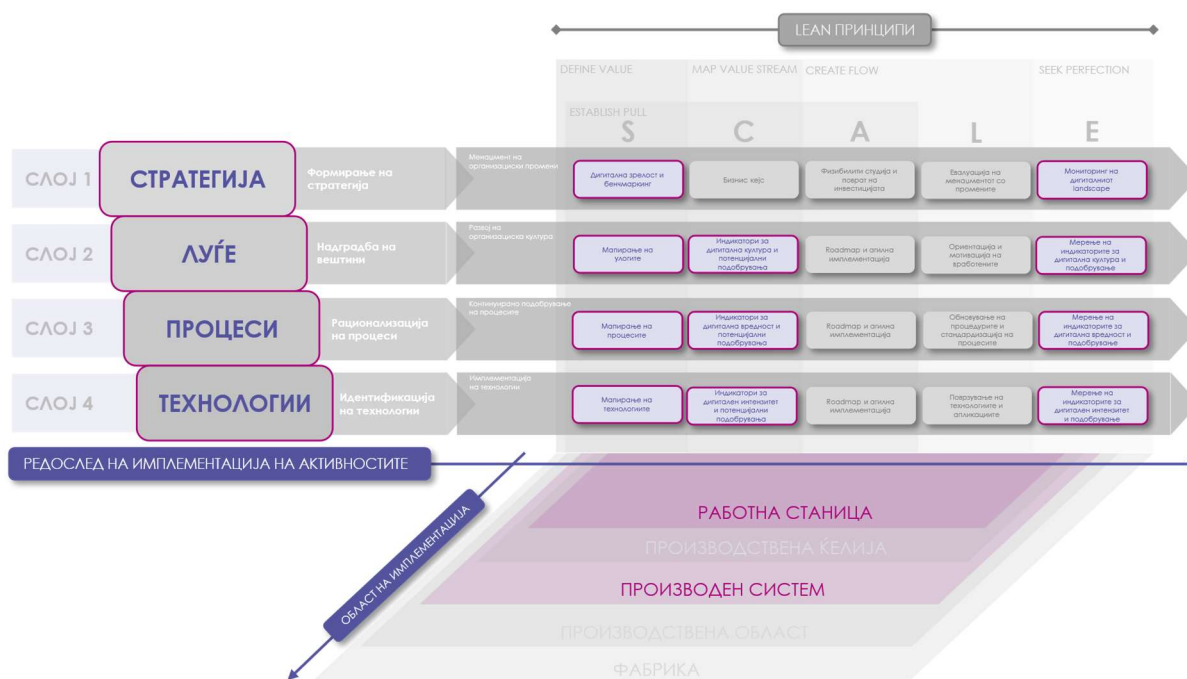
Позитивна страна на овој стандард е тоа што показателите се пред се наменети за дискретно производство. Сепак ова е повторно предност само во контекст на ова истражување, но недостаток и ограничување при примена во процесна индустрија.

Поврзаност со рамката за дигитална трансформација

За да се надмине јазот помеѓу концептуалната рамка и практичната примена, предложената рамка е операционализирана преку серија експериментални сценарија во Smart Learning Factory - Skorje. Секое сценарио претставува конкретна имплементација на одредени аспекти на рамката, додека мерењето на избраните показатели овозможува објективна евалуација на ефектите од имплементацијата во контролирана производна средина.

Идејата тука не е да се навлегува во стратешките потреби зошто некои дигитални решенија се имплементирани во SLFS, бидејќи ова е веќе направено од претходно. Целта е да сите имплементирани решенија се претворат во производствени сценарија со различни ниво на дигитализација (постепена имплементација на дигитална трансформација) со цел да се испита влијанието на ваквата постепена имплементација на перформансите на организацијата.

Во поглавјето за развој на рамката за дигитална трансформација неколку пати е напоменато дека експерименталниот дел цели кон делумно имплементирање на рамката, главно од аспект на мерењето на успешноста на дигиталната трансформација во производството.



Слика 5.55 Поврзаност на студиите на случаи со рамката за ДТ

Сите четири слоеви - стратегија, луѓе, процеси и технологии, имаат свое учество во мерењата во продолжение. Првиот чекор, Sketch, кој се однесува на дефинирање на постоечките процеси и технологии преку дизајнот на сценаријата. Дигиталната зрелост е измерена за секое сценарио преку модел на зрелост, што ги покрива активностите од слојот стратегија односно активностите од Sketch и Enhance.

Главниот дел од имплементацијата се состои од мерење на избрани показатели за дигитална култура, дигитална вредност и дигитален интензитет пред и после имплементацијата на секое од сценаријата.

Од аспект на област на имплементација, според Слика 5.55, сценаријата од 1 до 5 се изведуваат на ниво на работна станица (монтажа), додека останатите сценарија се однесуваат на целиот произведен систем на Smart Learning Factory - Skorje.

Експерименталните сценарија во SLFS ја рефлектираат постепената имплементација на рамката на различни нивоа, од индивидуално работно место до произведен систем, анализа на ефектите од дигиталната трансформација без потреба од целосна системска имплементација. Избраните показатели кои го покажуваат ефектот на ваквата имплементација се сепак во фокус, избрани според потребите на SLFS како пример за претпријатие, претставуваат квантифициван доказ за влијанието на дигиталната трансформација на перформансите на претпријатието.

6. ЗАКЛУЧОЦИ И НАСОКИ ЗА ИДНИ ИСТРАЖУВАЊА

6.1. Преглед на сработеното

Главната цел на дисертацијата е да даде научен и практичен придонес во областа на дигиталната трансформација на производствените компании преку развој на интегрирана рамка базирана на принципите на Lean менаџментот.

Со цел појасно да се прикажат постигнатите резултати и придонеси од истражувањето, во продолжение е даден систематски преглед на реализираните цели на дисертацијата, прикажани во форма на матрица. Во матрицата е наведено како предложените истражувачки цели се покриени преку поединечните поглавја на дисертацијата, при што деталното објаснување на нивната реализација е дадено во соодветните делови од текстот.

Табела 6.1. Преглед на постигнатите цели во истражувањето

Цели \ Поглавје	2	3	4	5
	Технолошка револуција	Дигитална трансформација во производство	Рамка за имплементација на дигитална трансформација	Студии на случаи
Добивање на продлабочени знаења за процесот на дигитална трансформација на производствените компании	■			
Добивање продлабочени знаења за поврзаноста на Lean менаџментот и дигиталните технологии.		■		
Истражување на предизвиците за дигитална трансформација на производствените компании.			■	
Развој и верификација на рамка за имплементација на дигитална трансформација во производствените компании			■	
Дизајнирање на различни производни сценарија кои инволвираат различни нивоа на оптимизација и дигитална трансформација.				■
Експериментално истражување на влијанието на интегрираната имплементацијата на дигиталните технологии и Lean принципите на производствените показатели во различни производни сценарија				■

Добивање на продлабочени знаења за дигиталните технологии, Lean менаџмент во Индустрија 4.0 и процесот на дигитална трансформација на производствените компании

Целта за добивање на продлабочени знаења за дигиталните технологии, Lean менаџментот во контекст на Индустрија 4.0 и процесот на дигитална трансформација на производствените компании е остварена преку систематски преглед и структурирана анализа на релевантната научна и стручна литература. Во рамки на анализата, концептите на Индустрија 4.0 и Lean менаџмент се дефинирани преку идентична аналитичка рамка која ги разгледува: технологиите како овозможувачи („enablers“), принципите како обликувачи („shapers“) и придобивките како оправдувачи („justifiers“). Ваквиот пристап овозможува јасно согледување на улогата на дигиталните технологии и управувачките принципи во трансформацијата на производствените системи.

Дополнително, извршена е анализа на концептуалната поврзаност и еволуцијата помеѓу Индустрија 4.0 и Индустрија 5.0, при што се идентификувани нивните комплементарни карактеристики, силни и слаби страни. Паралелно, направено е јасно разграничување помеѓу поимите дигитизација, дигитализација и дигитална трансформација, при што дигиталната трансформација се дефинира како сеопфатна организациска промена која ги опфаќа клучните слоеви: стратегија, луѓе, процеси и технологии.

Во завршниот дел од анализата е извршена систематска евалуација на релациите помеѓу Lean принципите и технологиите на Индустрија 4.0, со цел да се идентификува нивниот потенцијал за синергиска примена. Резултатите укажуваат дека Lean принципите обезбедуваат стабилна организациска и процесна основа за имплементација на дигиталните технологии, додека технологиите на Индустрија 4.0 овозможуваат дополнително унапредување на Lean практиките преку подобра видливост на процесите, автоматизација и поддршка на донесувањето одлуки базирано на податоци.

Истражување на предизвиците за дигитална трансформација на производствените компании.

Целта за истражување на предизвиците за дигитална трансформација на производствените компании е остварена преку систематски преглед и анализа на релевантна научна и стручна литература објавена во последните пет години. Преку оваа анализа беа идентификувани и систематизирани најчесто споменуваните групи на предизвици поврзани со имплементацијата на дигиталната трансформација, како што се недостиг на соодветни вештини кај работната сила, безбедносни ризици, тешкотии во управувањето со организациските промени, ограничени финансиски ресурси, недостиг на јасна дигитална стратегија и управувачка рамка, несоодветна или застарена инфраструктура, занемарување на корисничкото искуство, организациската култура и недостиг на стандардизација. Со систематизацијата на овие предизвици се обезбеди јасна основа за понатамошно развивање на структурирани пристапи и рамки за успешна имплементација на дигиталната трансформација во производствените компании.

Развој и верификација на рамка за имплементација на дигитална трансформација во производствените компании

Целта е остварена преку развој на концептуална рамка која ги интегрира клучните активности за планирање, структурирање и имплементација на дигиталната трансформација во слоевите стратегија, луѓе, процеси и технологија, како и преку нејзина верификација со бенчмаркинг анализа и експертска евалуација.

Користејќи го DSR методот за развој на рамка, во фазата на конципирање беа дефинирани главните потреби и проблеми, а потоа и целите на рамката. Проблемот разработен во дисертацијата произлегува од три клучни извори во рамки на „Triple Helix“ моделот: академијата, индустријата и државата. Од академски аспект постои недостиг на интегриран пристап за поврзување на Lean принципите и дигиталната трансформација, додека индустријата се соочува со висока стапка на неуспешни проекти поради недостаток на структуриран методолошки пристап. Истовремено, иако државните стратегии ја нагласуваат важноста на дигиталната трансформација, недостасуваат практични механизми за нивна систематска имплементација, особено во малите и средни претпријатија. Сите три аспекти во фазата на структурирање од

методологијата за развој на рамка се разработени во детали, при што генерирани се соодветни барања, а потоа и решенија за сите барања, а резултатот е рамката која се состои од четири слоја во кои треба да се одвива процесот на дигитална трансформација. Истите меѓусебно се поврзани во логичен редослед на имплементација, а дефинирани се главни (задолжителни) активности кои компаниите треба да ги преземат, но и континуирани активности кои овозможуваат одржливост. Рамката е детализирана со предложени чекори за имплементација во секој од слоевите. Посебен акцент, што е поврзано со Lean, се става на системот за мерење на учинок со цел осигурување на континуирано подобрување. Системот се состои од три столба, дигитална култура, дигитална вредност и дигитален интензитет, при што вклучува (1) дефинирање на соодветни показатели во сите три столба пред имплементацијата, а во согласност со стратегијата и зрелоста на претпријатието, и (2) мониторинг на избраните показатели после имплементацијата на дигиталните решенија.

Дизајнирање на различни производни сценарија кои инволвираат различни нивоа на оптимизација и дигитална трансформација.

Целта за дизајнирање на различни производни сценарија кои инволвираат различни нивоа на оптимизација и дигитална трансформација е остварена преку креирање и имплементација на шеснаесет производствени сценарија во фабрика за учење. Овие сценарија се дизајнирани со цел да ја симулираат постепената еволуција на дигиталната зрелост на производствените системи преку воведување на различни комбинации на Lean подобрувања и дигитални технологии. На овој начин се создаде контролирана експериментална средина која овозможува систематско анализирање на влијанието на различни нивоа на оптимизација и дигитална трансформација врз производствените перформанси.

Експериментално истражување на влијанието на интегрираната имплементацијата на дигиталните технологии и Lean принципите на производствените показатели во различни производни сценарија

Експерименталното истражување на претходно дефинираните показатели беше реализирано во фабрика за учење, преку изведување на сите шеснаесет производствени сценарија согласно однапред дефиниран план за експериментирање и соодветен број повторувања на мерењата.

Резултатите најпрво се презентирани поединечно за секоја од трите димензии, односно за секој показател одделно, при што се извршува првична анализа на нивната промена во зависност од применетото производствено сценарио. Во рамки на првата димензија, дигитална култура, показателите се мерат преку структуриран прашалник кој учесниците во истражувањето го пополнуваат делумно за време на изведување на сценаријата, а делумно по нивното завршување.

Во димензијата дигитална вредност, показателите се утврдуваат со примена на стандардни методи од студијата на работата, користејќи стандарден образец за мерење и ангажирање на двајца снимачи во текот на изведувањето на сите сценарија. Последната димензија (дигитален интензитет) опфаќа показатели кои се определуваат преку директно броење или пресметување врз основа на фактичката состојба поврзана со имплементираниите дигитална инфраструктура и направените инвестиции во неа.

Во сите изнесени анализи може да се потврди дека дигиталната трансформација претставува широк и пред сè организациски процес, за чија успешна имплементација се потребни координирани активности во различни организациски слоеви. Ова дополнително се потврдува и квантитативно преку измерените показатели, кои покажуваат дека промените во производствените перформанси не се резултат само на воведување на одделни технологии, туку на нивната интеграција со процесите, луѓето и стратегијата на организацијата. Добиените резултати укажуваат дека систематски планираната и мерена дигитална трансформација може да доведе до значајни подобрувања во продуктивноста, квалитетот и ефикасноста на производните системи, што ја потврдува нејзината практична применливост и релевантност во современите производствени компании.

6.2. Примена на резултатите од истражувањето

Резултатите од ова истражување имаат значајна практична примена во реалната индустрија, пред сè преку развиената рамка за имплементација на дигитална трансформација и системот на показатели за мерење на нејзината успешност. Рамката обезбедува структуриран пристап за планирање, организирање и имплементација на дигитални иницијативи низ различните организациски слоеви: стратегија, луѓе, процеси и технологии, додека предложените показатели овозможуваат објективно следење и евалуација на ефектите од дигиталната трансформација.

Од академски аспект, истражувањето придонесува со интегриран пристап за имплементација на дигиталната трансформација базиран на Lean принципите, со што се надминува честата фрагментирана примена на овие концепти во постојната литература. На овој начин се воспоставува појасна теоретска и методолошка основа за идни истражувања поврзани со синергијата помеѓу Lean менаџментот и дигиталните технологии.

Од аспект на индустријата, предложената рамка адресира значаен дел од предизвиците поврзани со имплементацијата на дигиталната трансформација, како што се недостатокот на структуриран пристап, нејасната стратегија и организациските бариери. Со тоа се создава потенцијал за намалување на високата стапка на неуспешни проекти за дигитална трансформација, преку појасно дефинирани активности, приоритети и механизми за следење на резултатите.

Од перспектива на државата и поширокиот економски екосистем, рамката претставува корисна основа за систематска поддршка на дигиталната трансформација во компаниите, особено во средини со пониска дигитална зрелост, како што е Република Северна Македонија. Таа може да послужи како унифициран пристап за насочување на компаниите во процесот на трансформација, додека предложените показатели овозможуваат објективно следење на нивната успешност и создавање основа за дизајнирање на соодветни политики, програми за поддршка и мерки за унапредување на конкурентноста на индустријата.

Преку развојот на трудот во контекст на Smart Learning Factory - Skopje, резултатите имаат влијание на сите три горенаведени аспекти заедно. Со оглед на тоа што Smart Learning Factory - Skopje е првата фабрика за учење во нашата држава, трудот придонесува за воспоставување структурирана основа за идни истражувања, практична едукација и обуки поврзани со Lean менаџментот и дигиталната трансформација. На овој начин се создава средина која овозможува поефикасно поврзување помеѓу академијата и

индустријата, развој на компетенции кај студентите и инженерите, како и поддршка на компаниите и институциите во процесите на дигитална трансформација и континуирано подобрување.

6.3. Насоки за идни истражувања

Врз основа на добиените резултати и идентификуваните ограничувања, се отвораат неколку насоки за понатамошно продлабочување на истражувањето и проширување на примената на рамката за дигитална трансформација и начините за мерење на показателите за учинок.

– **Продлабочена анализа и стандардизација на показателите за дигитална култура, дигитална вредност и дигитален интензитет**

Идните истражувања треба да овозможат сеопфатна анализа на меѓусебните односи и динамиката на показателите за дигитална култура, дигитална вредност и дигитален интензитет, со цел подобро разбирање на нивното влијание врз перформансите на производните процеси и успешноста на дигиталната трансформација. Потребни се и напори за подобрување на постоечките стандарди за показатели, со цел истите да бидат применливи и во екосистеми со помала зрелост на луѓето, технологиите и процесите, како и напори за стандардизација на листа со показатели за дигитална култура и дигитален интензитет.

– **Развој на рамка и систем за мерење на показателите во реално време**

Идните истражувања треба да бидат насочени кон развој на рамки, методи и системи за автоматизирано и континуирано собирање и следење на показателите во фабриките за учење и реалните производствени претпријатија, како и нивна анализа во реално време, потенцијално потпомогната од вештачка интелигенција. Сегашната инфраструктура не го овозможуваше тоа, но постои можност во блиска иднина лабораторијата да добие дополнителна опрема што ќе го олесни имплементирањето на оваа идеја.

– **Имплементација и емпириска валидација на рамката во реални производствени претпријатија**

Со оглед на тоа што овој труд ги заснова своите заклучоци на резултати добиени во контролирана лабораториска средина (фабрика за учење), идните истражувања треба да се насочат кон систематска имплементација на рамката за дигитална трансформација во реални индустриски услови. Ова би овозможило екстерна валидација на резултатите, проверка на нејзината применливост во комплексни организациски структури и емпириско мерење на ефектите врз дигиталната култура, дигиталниот интензитет и создадената дигитална вредност во реалните производствени системи.

– **Стандардизација на излезите во слоевите на рамката за дигитална трансформација**

Идни истражувачки напори треба да бидат насочени и кон стандардизација на излезите и клучните показатели за перформанси по поединечни слоеви на рамката, преку развој на унифицирана терминологија, документација и обрасци, со цел олеснување на практичната примена и споредливоста на резултатите, а што ваквиот тип на концептуална рамка би преминал во структурирана методологија. При ваквата адаптација, идните истражувања би можеле да ги разгледаат или утврдат можностите за прилагодување на рамката во други сектори, како што е

ИТ секторот, во согласност со повратните информации добиени во фазата на експертска валидација.

– **Развој на стандардизирани индекси за димензиите за мерење на перформансите**

Истражувањето треба да се фокусира и на развој на сеопфатни и стандардизирани индекси за дигитална култура, дигитална вредност и дигитален интензитет, валидирани во соработка со индустриски партнери. Ваквите индекси треба да овозможат сигурно мерење, бенчмаркинг и споредба на напредокот на дигиталната трансформација помеѓу компаниите, а воедно да обезбедат практична релевантност и методолошка робусност.

7. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Argilovski, E. Vasileska, O. Tuteski, B. Kusigerski, B. Jovanoski, and M. Tomov, “BRIDGING THE GAP: QUALITATIVE COMPARATIVE ANALYSIS OF INDUSTRY 4.0 AND INDUSTRY 5.0,” *Mechanical Engineering-Scientific Journal*, vol. 42, no. 1, pp. 61–66, 2024, doi: 10.55302/MESJ24421061a.
- [2] Surendra Mohan Devaraj, “Digital Transformation and Innovation : Driving Business Growth,” *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, vol. 10, no. 5, pp. 885–894, Nov. 2024, doi: 10.32628/CSEIT241051077.
- [3] N. Ramesh and D. Delen, “Digital Transformation: How to Beat the 90% Failure Rate?,” *IEEE Engineering Management Review*, vol. 49, no. 3, pp. 22–25, Sep. 2021, doi: 10.1109/EMR.2021.3070139.
- [4] H. G. Demirel, “WHY DO DIGITAL TRANSFORMATION INITIATIVES FAIL? DIGITAL MINDSETS AS AN INVISIBLE STRATEGIC COMPONENT,” *Yönetim Bilimleri Dergisi*, Sep. 2024, doi: 10.35408/comuybd.1516665.
- [5] M. Grebe, V. Lyon, M. Harnisch, A. Chatterjee, S. A. Kok, and J. Brock, “Most Large-Scale Tech Programs Fail—Here’s How to Succeed,” Boston Consulting Grup. Accessed: Jan. 10, 2026. [Online]. Available: <https://www.bcg.com/publications/2024/most-large-scale-tech-programs-fail-how-to-succeed>
- [6] “Losing from day one: Why even successful transformations fall short,” Dec. 2021. Accessed: Jan. 10, 2026. [Online]. Available: www.mckinsey.com
- [7] A. Argilovski, B. Jovanoski, and R. Minovski, “Challenges for Implementation of Digital Transformation Across Industries,” 2026, pp. 394–404. doi: 10.1007/978-3-032-03722-0_33.
- [8] N. Omrani, N. Rejeb, A. Maalaoui, M. Dabić, and S. Kraus, “Drivers of Digital Transformation in SMEs,” *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 71, pp. 5030–5043, 2024, doi: 10.1109/TEM.2022.3215727.
- [9] O. Kohnke, “It’s Not Just About Technology: The People Side of Digitization,” in *Shaping the Digital Enterprise*, Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 69–91. doi: 10.1007/978-3-319-40967-2_3.
- [10] “National ICT Strategy of Republic of North Macedonia (2023 - 2027),” Skopje, Dec. 2022. Accessed: Jan. 10, 2026. [Online]. Available: www.mdt.gov.mk
- [11] “National Development Strategy of North Macedonia (2024-2044),” Skopje, Oct. 2024. Accessed: Jan. 10, 2026. [Online]. Available: www.nrs.mk
- [12] “Smart Specialization Strategy of the Republic of North Macedonia,” Nov. 2023. Accessed: Jan. 10, 2026. [Online]. Available: www.mon.gov.mk
- [13] J. Chen and L. Shen, “A Synthetic Review on Enterprise Digital Transformation: A Bibliometric Analysis,” *Sustainability*, vol. 16, no. 5, p. 1836, Feb. 2024, doi: 10.3390/su16051836.
- [14] L. Shi, Y. Mai, and Y. J. Wu, “Digital Transformation: A Bibliometric Analysis,” *Journal of Organizational and End User Computing*, vol. 34, no. 7, pp. 1–20, Jun. 2022, doi: 10.4018/JOEUC.302637.

- [15] M. Stojkovic and J. Butt, "Industry 4.0 Implementation Framework for the Composite Manufacturing Industry," *Journal of Composites Science*, vol. 6, no. 9, p. 258, Sep. 2022, doi: 10.3390/jcs6090258.
- [16] W. Serrano, "DigStratCon: A Digital or Technology Strategy Framework," *Adm. Sci.*, vol. 15, no. 11, p. 436, Nov. 2025, doi: 10.3390/admsci15110436.
- [17] H. Shaughnessy, "Creating digital transformation: strategies and steps," *Strategy & Leadership*, vol. 46, no. 2, pp. 19–25, Mar. 2018, doi: 10.1108/SL-12-2017-0126.
- [18] A. Saleh and M. M. Awny, "DIGITAL TRANSFORMATION STRATEGY FRAMEWORK," Dec. 2020.
- [19] A. Argilovski, B. Jovanoski, R. Minovski, and A. Kochov, "Industry 4.0 for more competitive SMEs - Review of existing Industry 4.0 maturity models," in *Creating a European IEM Future at the Intersection Innovation, Digitalisation and Sustainability*, B. M. Zunk and A. Omazic, Eds., Graz, Austria, Jun. 2022, pp. 41–47.
- [20] A. Argilovski, B. Jovanoski, and R. Minovski, "An overview of the Digital Transformation and Industry 4.0 technologies implementation frameworks," in *19th International Scientific Conference on Industrial Systems*, Faculty of Technical Sciences, 2023, pp. 34–39. doi: 10.24867/IS-2023-T1.1-7_03841.
- [21] Q. Adnan, H. Kaidi, M. Masrom, and H. Hamzah, "IoT Implementation Framework to Support Industry 4.0 in the Malaysian Manufacturing Industries: A Systematic Review," *International Journal of Computing and Digital Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 875–888, Sep. 2023, doi: 10.12785/ijcds/140168.
- [22] H. Lukman, "Conceptual Framework of Cloud Computing Implementation On Start-Up Companies With Approach," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1007, p. 012176, Dec. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/1007/1/012176.
- [23] J. H. Loaiza, R. J. Cloutier, and K. Lippert, "Proposing a Small-Scale Digital Twin Implementation Framework for Manufacturing from a Systems Perspective," *Systems*, vol. 11, no. 1, p. 41, Jan. 2023, doi: 10.3390/systems11010041.
- [24] Z. Korachi and B. Bounabat, "Integrated Methodological Framework for Digital Transformation Strategy Building (IMFDS)," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 10, no. 12, 2019, doi: 10.14569/IJACSA.2019.0101234.
- [25] C. C. Osorio-Gómez, R. F. Herrera, J. M. Prieto-Osorio, and E. Pellicer, "Conceptual model for implementation of digital transformation and organizational structure in the construction sector," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, no. 7, p. 102749, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.asej.2024.102749.
- [26] M. Hashim, *Art of Digital Jujutsu*. 2016.
- [27] M. Baslyman, "Digital Transformation From the Industry Perspective: Definitions, Goals, Conceptual Model, and Processes," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 42961–42970, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3166937.
- [28] E. Kahveci, "Digital Transformation in SMEs: Enablers, Interconnections, and a Framework for Sustainable Competitive Advantage," *Adm. Sci.*, vol. 15, no. 3, p. 107, Mar. 2025, doi: 10.3390/admsci15030107.
- [29] J. Butt, "A conceptual framework to support digital transformation in manufacturing using an integrated business process management approach," *Designs (Basel)*, vol. 4, no. 3, pp. 1–39, Sep. 2020, doi: 10.3390/designs4030017.
- [30] M. Majdalawieh and S. Khan, "Building an Integrated Digital Transformation System Framework: A Design Science Research, the Case of FedUni," *Sustainability*, vol. 14, no. 10, p. 6121, May 2022, doi: 10.3390/su14106121.
- [31] Y. Javadi, "7 Pillars of Digital Transformation Framework for Continuous Business Growth," *iBusiness*, vol. 14, no. 03, pp. 139–149, 2022, doi: 10.4236/ib.2022.143011.
- [32] D. Romero, M. Flores, M. Herrera, and H. Resendez, "Five Management Pillars for Digital Transformation Integrating the Lean Thinking Philosophy," in *2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, IEEE, Jun. 2019, pp. 1–8. doi: 10.1109/ICE.2019.8792650.

- [33] S. Frecassetti, M. Rossini, and A. Portioli-Staudacher, "Unleashing Industry 4.0: Leveraging Lean Practices to Overcome Implementation Barriers," *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 71, pp. 10797–10814, 2024, doi: 10.1109/TEM.2024.3396448.
- [34] F. Cunha, J. Dinis-Carvalho, and R. M. Sousa, "Performance Measurement Systems in Continuous Improvement Environments: Obstacles to Their Effectiveness," *Sustainability*, vol. 15, no. 1, p. 867, Jan. 2023, doi: 10.3390/su15010867.
- [35] J. vom Brocke, A. Hevner, and A. Maedche, "Introduction to Design Science Research," 2020, pp. 1–13. doi: 10.1007/978-3-030-46781-4_1.
- [36] S. Vaidya, P. Ambad, and S. Bhosle, "Industry 4.0 – A Glimpse," *Procedia Manuf.*, vol. 20, pp. 233–238, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.034.
- [37] M. Haseeb, H. I. Hussain, B. Ślusarczyk, and K. Jermstiparsert, "Industry 4.0: A Solution towards Technology Challenges of Sustainable Business Performance," *Soc. Sci.*, vol. 8, no. 5, p. 154, May 2019, doi: 10.3390/socsci8050154.
- [38] I. Graessler and A. Poehler, "Human-centric design of cyber-physical production systems," *Procedia CIRP*, vol. 84, pp. 251–256, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.04.199.
- [39] R. Davies, T. Coole, and A. Smith, "Review of Socio-technical Considerations to Ensure Successful Implementation of Industry 4.0," *Procedia Manuf.*, vol. 11, pp. 1288–1295, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.256.
- [40] H. Cañas, J. Mula, M. Díaz-Madroño, and F. Campuzano-Bolarín, "Implementing Industry 4.0 principles," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 158, p. 107379, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107379.
- [41] T. Čater, B. Čater, M. Černe, M. Koman, and T. Redek, "Industry 4.0 technologies usage: motives and enablers," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 32, no. 9, pp. 323–345, Dec. 2021, doi: 10.1108/JMTM-01-2021-0026.
- [42] Dr. K. Umachandran, I. Jurcic, D. Ferdinand-James, M. M. T. Said, and A. A. Rashid, "Gearing Up Education Towards Industry 4.0," *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTERS & TECHNOLOGY*, vol. 17, no. 2, pp. 7305–7311, Sep. 2018, doi: 10.24297/ijct.v17i2.7754.
- [43] G. Erboz, "How To Define Industry 4.0: Main Pillars Of Industry 4.0," in *Managerial trends in the development of enterprises in globalization era*, Nitra, Slovakia, Nov. 2017.
- [44] S. U. Rehman and S. Ejaz, "AN IMPLEMENTATION OF 9 PILLARS OF INDUSTRY 4.0 IN CONVENTIONAL FOOTWEAR INDUSTRY MODEL," *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, vol. 04, no. 12, pp. 283–286, May 2020, doi: 10.33564/IJEAST.2020.v04i12.047.
- [45] R. Ružarovský, R. Holubek, M. Janíček, K. Velišek, and G. O. Tirian, "Analysis of the Industry 4.0 key elements and technologies implementation in the Festo Didactic educational systems MPS 203 I4.0," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1781, no. 1, p. 012030, Feb. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1781/1/012030.
- [46] S. Al Zadjali and A. Ullah, "Impact of Industry 4.0 in Manufacturing Sector," *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF MANAGEMENT SCIENCE AND BUSINESS ADMINISTRATION*, vol. 7, no. 6, pp. 25–33, Sep. 2021, doi: 10.18775/ijmsba.1849-5664-5419.2014.76.1003.
- [47] J. Hamilton Ortiz, W. Gutierrez Marroquin, and L. Zambrano Cifuentes, "Industry 4.0: Current Status and Future Trends," in *Industry 4.0 - Current Status and Future Trends*, IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.90396.
- [48] E. Asadollahi-Yazdi, P. Couzon, N. Quy Nguyen, Y. Ouazene, and F. Yalaoui, "Industry 4.0: Revolution or Evolution?," *American Journal of Operations Research*, vol. 10, no. 6, Oct. 2020.
- [49] B. P. Santos, F. Charrua-Santos, and T. M. Lima, "Industry 4.0: an overview," Jul. 2018.
- [50] C. R. Mendes, F. S. Bortoli, and C. da Costa, "The Digitalization of Manufacturing: A Case Study," *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, vol. 7, no. 6, pp. 100–106, 2020, doi: 10.22161/ijaers.76.13.
- [51] S. Misra, C. Roy, and A. Mukherjee, *Introduction to Industrial Internet of Things and Industry 4.0*. CRC Press, 2021.
- [52] K. Umachandran, "Industry 4.0 and its associated technologies," *Journal of Emerging Technologies*, vol. 1, no. 1, Feb. 2021.

- [53] T. Čater, B. Čater, M. Černe, M. Koman, and T. Redek, "Industry 4.0 technologies usage: motives and enablers," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 32, no. 9, pp. 323–345, Dec. 2021, doi: 10.1108/JMTM-01-2021-0026.
- [54] J. Butt, "A Strategic Roadmap for the Manufacturing Industry to Implement Industry 4.0," *Designs (Basel)*, vol. 4, no. 2, p. 11, May 2020, doi: 10.3390/designs4020011.
- [55] W. Kinghorn, *Digital Transformation in Your Manufacturing Business*. Boca Raton: CRC Press, 2024. doi: 10.1201/9781032642215.
- [56] R. Benotsmane, G. Kovács, and L. Dudás, "Economic, Social Impacts and Operation of Smart Factories in Industry 4.0 Focusing on Simulation and Artificial Intelligence of Collaborating Robots," *Soc. Sci.*, vol. 8, no. 5, p. 143, May 2019, doi: 10.3390/socsci8050143.
- [57] M. Saturno, V. M. Pertel, and F. Deschamps, "Proposal of an automation solutions architecture for Industry 4.0," in *24th International Conference on Production Research*, Poznan, Poland, Jul. 2017.
- [58] S. Almanasra, "Applications of integrating artificial intelligence and big data: A comprehensive analysis," *Journal of Intelligent Systems*, vol. 33, no. 1, Nov. 2024, doi: 10.1515/jisys-2024-0237.
- [59] I. Grobelna, "Internet of Things and Cyber-Physical Systems," *Future Internet*, vol. 14, no. 11, p. 337, Nov. 2022, doi: 10.3390/fi14110337.
- [60] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, "The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0," *Procedia Manuf.*, vol. 11, pp. 545–554, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.148.
- [61] M. B. Ozcan, B. Konuk, and Y. M. Yesilcimen, "Big Data Analytics in Industry 4.0," 2023, pp. 171–199. doi: 10.1007/978-981-19-2012-7_8.
- [62] S. Yu, Q. Qing, C. Zhang, A. Shehzad, G. Oatley, and F. Xia, "Data-Driven Decision-Making in COVID-19 Response: A Survey," *IEEE Trans. Comput. Soc. Syst.*, vol. 8, no. 4, pp. 1016–1029, Aug. 2021, doi: 10.1109/TCSS.2021.3075955.
- [63] Ishwarappa and J. Anuradha, "A Brief Introduction on Big Data 5Vs Characteristics and Hadoop Technology," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 48, pp. 319–324, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.04.188.
- [64] P. K. D. Pramanik, S. Pal, and M. Mukhopadhyay, "Healthcare Big Data," 2019, pp. 72–100. doi: 10.4018/978-1-5225-7071-4.ch004.
- [65] M. N. O. Sadiku, T. J. Ashaolu, A. Ajayi-Majebi, and S. M. Musa, "Big Data in Manufacturing," *International Journal Of Scientific Advances*, vol. 2, no. 1, 2021, doi: 10.51542/ijscia.v2i1.11.
- [66] FOSTEC & Company, "Big Data Analytics."
- [67] M. J. Mazzei and D. Noble, "Big Data and Strategy: Theoretical Foundations and New Opportunities," in *Strategy and Behaviors in the Digital Economy*, IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.84819.
- [68] C. Research Mikalef, O. Ilias, and N. Michail, "BIG DATA AND STRATEGY: A RESEARCH FRAMEWORK," in *Tenth Mediterranean Conference on Information Systems (MCIS)*, Paphos, Cyprus, 2016.
- [69] Md. A. Salman, K. Mondal, M. S. Kobir, Mst. K. K. Khusi, M. Rifat, and S. I. Ghani, "Harnessing big data analytics for industry 4.0: a hybrid architecture of revolutionary technologies and predictive implementation in manufacturing," *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, Nov. 2025, doi: 10.1007/s13198-025-03045-3.
- [70] S. Ahmetoglu, Z. Che Cob, and N. Ali, "Internet of Things Adoption in the Manufacturing Sector: A Conceptual Model from a Multi-Theoretical Perspective," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 6, p. 3856, Mar. 2023, doi: 10.3390/app13063856.
- [71] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, "Concept and Hardware Considerations for Product-Service System Achievement in Internet of Things," in *2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, IEEE, Apr. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/WITS.2019.8723755.
- [72] A. K. Sikder, G. Petracca, H. Aksu, T. Jaeger, and S. Uluagac, "A Survey on Sensor-based Threats to Internet-of-Things (IoT) Devices and Applications," Feb. 2018.
- [73] F. Ortin and D. O'Shea, "Towards an Easily Programmable IoT Framework Based on Microservices," *Journal of Software*, vol. 13, no. 1, pp. 90–102, Feb. 2018, doi: 10.17706/jsw.13.2.90-102.

- [74] M. SOORI, R. DASTRES, B. AREZOO, and F. Karimi Ghaleh JOUGH, “Intelligent robotic systems in Industry 4.0: A review,” *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 2024007–2024007, 2024, doi: 10.51393/j.jamst.2024007.
- [75] Ş. Çiğdem, I. Meidute-Kavaliauskiene, and B. Yıldız, “Industry 4.0 and Industrial Robots: A Study from the Perspective of Manufacturing Company Employees,” *Logistics*, vol. 7, no. 1, p. 17, Mar. 2023, doi: 10.3390/logistics7010017.
- [76] Z. Zhang and J. Zeng, “A Review on Development and Application of Industrial Robot,” *Academic Journal of Science and Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 78–81, Aug. 2022, doi: 10.54097/ajst.v2i2.1165.
- [77] A. A. Kumar, U. K. uz Zaman, and P. Plapper, “Collaborative Robots,” in *Handbook of Manufacturing Systems and Design*, Boca Raton: CRC Press, 2023, pp. 90–106. doi: 10.1201/9781003327523-8.
- [78] T. Lackner, J. Hermann, C. Kuhn, and D. Palm, “Review of autonomous mobile robots in intralogistics: state-of-the-art, limitations and research gaps,” *Procedia CIRP*, vol. 130, pp. 930–935, 2024, doi: 10.1016/j.procir.2024.10.187.
- [79] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, and R. Suman, “Substantial capabilities of robotics in enhancing industry 4.0 implementation,” *Cognitive Robotics*, vol. 1, pp. 58–75, 2021, doi: 10.1016/j.cogr.2021.06.001.
- [80] Z. Liu, Q. Liu, W. Xu, L. Wang, and Z. Zhou, “Robot learning towards smart robotic manufacturing: A review,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 77, p. 102360, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.rcim.2022.102360.
- [81] I. Attiya and X. Zhang, “Cloud Computing Technology: Promises and Concerns,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 159, no. 9, pp. 32–37, Feb. 2017, doi: 10.5120/ijca2017913094.
- [82] S. V Katkar, S. K. Kharade, K. G. Kharade, and R. K. Kamat, *Study of Cloud Computing and Its Architecture*. 2022.
- [83] www.geeksforgeeks.org, “Architecture of Cloud Computing.”
- [84] Hitesh Premshankar Rai, Pavan Ogeti, Narendra Sharad Fadnavis, Gireesh Bhaulal Patil, and Uday Krishna Padyana, “Integrating Public and Private Clouds: The Future of Hybrid Cloud Solutions,” *Universal Research Reports*, vol. 8, no. 2, pp. 143–153, Aug. 2024, doi: 10.36676/urr.v9.i4.1320.
- [85] U. S. Umar and M. E. Rana, “Cloud Revolution in Manufacturing: Exploring Benefits, Applications, and Challenges in the Era of Digital Transformation,” in *2024 ASU International Conference in Emerging Technologies for Sustainability and Intelligent Systems (ICETISIS)*, IEEE, Jan. 2024, pp. 1890–1897. doi: 10.1109/ICETISIS61505.2024.10459473.
- [86] Y. Liu, L. Wang, X. V. Wang, X. Xu, and L. Zhang, “Scheduling in cloud manufacturing: state-of-the-art and research challenges,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 57, no. 15–16, pp. 4854–4879, Aug. 2019, doi: 10.1080/00207543.2018.1449978.
- [87] A. Harding, A. Pramanik, A. K. Basak, C. Prakash, and S. Shankar, “Application of additive manufacturing in the biomedical field- A review,” *Annals of 3D Printed Medicine*, vol. 10, p. 100110, May 2023, doi: 10.1016/j.stlm.2023.100110.
- [88] R. Kumar, M. Kumar, and J. S. Chohan, “The role of additive manufacturing for biomedical applications: A critical review,” *J. Manuf. Process.*, vol. 64, pp. 828–850, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.02.022.
- [89] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, “The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0,” *Procedia Manuf.*, vol. 11, pp. 545–554, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.148.
- [90] M. Janiszewski, L. Uotinen, M. Szydłowska, H. Munukka, J. Dong, and M. Rinne, “Visualization of 3D rock mass properties in underground tunnels using extended reality,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 703, no. 1, p. 012046, Mar. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/703/1/012046.
- [91] M. Vasarainen, S. Paavola, and L. Vetoshkina, “A Systematic Literature Review on Extended Reality: Virtual, Augmented and Mixed Reality in Working Life,” *International Journal of Virtual Reality*, vol. 21, no. 2, pp. 1–28, Oct. 2021, doi: 10.20870/IJVR.2021.21.2.4620.
- [92] F. Bondah, T. McLean Francis, and R. Kimmons, “Augmented Reality,” *EdTechnica*, 2023, doi: 10.59668/371.13080.

- [93] J. M. Zheng, K. W. Chan, and I. Gibson, "Virtual reality," *IEEE Potentials*, vol. 17, no. 2, pp. 20–23, 1998, doi: 10.1109/45.666641.
- [94] M. Speicher, B. D. Hall, and M. Nebeling, "What is Mixed Reality?," in *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA: ACM, May 2019, pp. 1–15. doi: 10.1145/3290605.3300767.
- [95] D. BabuL.Arasu, S. AnisBasharuddin, N. ZulailaZulShukor, and W. M. N. Wan Zainon, "A Review on Augmented Reality Technology," *International Journal of Emerging Research in Management and Technology*, vol. 7, no. 1, p. 22, Jun. 2018, doi: 10.23956/ijermt.v7i1.19.
- [96] Y. Chen, Q. Wang, H. Chen, X. Song, H. Tang, and M. Tian, "An overview of augmented reality technology," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1237, no. 2, p. 022082, Jun. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1237/2/022082.
- [97] S. Liang, "Research Proposal on Reviewing Augmented Reality Applications for Supporting Ageing Population," *Procedia Manuf.*, vol. 3, pp. 219–226, 2015, doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.132.
- [98] G. Plakas, S. T. Ponis, K. Agalios, E. Aretoulaki, and S. P. Gayialis, "Augmented Reality in Manufacturing and Logistics: Lessons Learnt from a Real-Life Industrial Application," *Procedia Manuf.*, vol. 51, pp. 1629–1635, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.227.
- [99] S. Vaidya, P. Ambad, and S. Bhosle, "Industry 4.0 – A Glimpse," *Procedia Manuf.*, vol. 20, pp. 233–238, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.034.
- [100] M. Pérez-Lara, J. A. Saucedo-Martínez, J. A. Marmolejo-Saucedo, T. E. Salais-Fierro, and P. Vasant, "Vertical and horizontal integration systems in Industry 4.0," *Wireless Networks*, vol. 26, no. 7, pp. 4767–4775, Oct. 2020, doi: 10.1007/s11276-018-1873-2.
- [101] R. Ružarovský, R. Holubek, M. Janiček, K. Velíšek, and G. O. Tirian, "Analysis of the Industry 4.0 key elements and technologies implementation in the Festo Didactic educational systems MPS 203 I4.0," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1781, no. 1, p. 012030, Feb. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1781/1/012030.
- [102] A. Alqudhaibi, M. Albarrak, S. Jagtap, N. Williams, and K. Saloniitis, "Securing industry 4.0: Assessing cybersecurity challenges and proposing strategies for manufacturing management," *Cyber Security and Applications*, vol. 3, p. 100067, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.csa.2024.100067.
- [103] Ž. Turk, B. García de Soto, B. R. K. Mantha, A. Maciel, and A. Georgescu, "A systemic framework for addressing cybersecurity in construction," *Autom. Constr.*, vol. 133, p. 103988, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103988.
- [104] J. Prinsloo, S. Sinha, and B. von Solms, "A Review of Industry 4.0 Manufacturing Process Security Risks," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 23, p. 5105, Nov. 2019, doi: 10.3390/app9235105.
- [105] Seleim, A. Azab, and T. AlGeddawy, "Simulation Methods for Changeable Manufacturing," *Procedia CIRP*, vol. 3, pp. 179–184, 2012, doi: 10.1016/j.procir.2012.07.032.
- [106] D. Mourtzis, "Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 7, pp. 1927–1949, Apr. 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1636321.
- [107] A. Kampa, "Modeling and Simulation of a Digital Twin of a Production System for Industry 4.0 with Work-in-Process Synchronization," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 22, p. 12261, Nov. 2023, doi: 10.3390/app132212261.
- [108] D. Mourtzis, M. Doukas, and D. Bernidaki, "Simulation in Manufacturing: Review and Challenges," *Procedia CIRP*, vol. 25, pp. 213–229, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.10.032.
- [109] L. Judijanto, "Artificial Intelligence in Industry 4.0: A Bibliometric Analysis of Research Trends," *West Science Information System and Technology*, vol. 3, no. 01, pp. 75–83, Apr. 2025, doi: 10.58812/wsist.v3i01.1850.
- [110] R. X. Gao, J. Krüger, M. Merklein, H.-C. Möhring, and J. Váncza, "Artificial Intelligence in manufacturing: State of the art, perspectives, and future directions," *CIRP Annals*, vol. 73, no. 2, pp. 723–749, 2024, doi: 10.1016/j.cirp.2024.04.101.
- [111] O. Mypati, A. Mukherjee, D. Mishra, S. K. Pal, P. P. Chakrabarti, and A. Pal, "A critical review on applications of artificial intelligence in manufacturing," *Artif. Intell. Rev.*, vol. 56, no. S1, pp. 661–768, Oct. 2023, doi: 10.1007/s10462-023-10535-y.

- [112] R. Hall, S. Schumacher, and A. Bildstein, "Systematic Analysis of Industrie 4.0 Design Principles," *Procedia CIRP*, vol. 107, pp. 440–445, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.05.005.
- [113] N. Ilanković, D. Živanić, A. Zelić, M. Guban, and L. Szabo, "BASIC PRINCIPLES OF INDUSTRY 4.0 AS THE FOUNDATION FOR SMART FACTORIES AND DIGITAL SUPPLY NETWORKS," Belgrade: International Conference Sustainable Logistics 4.0, 2019.
- [114] M. Mamad, "Challenges and Benefits of Industry 4.0: an overview," *International Journal of Supply and Operations Management*, vol. 5, no. 3, pp. 256–265, Aug. 2018.
- [115] L. Thames and D. Schaefer, "Industry 4.0: An Overview of Key Benefits, Technologies, and Challenges," 2017, pp. 1–33. doi: 10.1007/978-3-319-50660-9_1.
- [116] A. Ullah, S. Imran, and D. Roy, "The Benefits of Using Industry 4.0 in the Manufacturing Sector," 2024, pp. 83–103. doi: 10.1007/978-981-99-4819-2_7.
- [117] I. González, A. J. Calderón, F. J. F. Gaspar, and D. Calderón, "Advanced Industry 4.0/5.0: Intelligence and Automation," *Electronics (Basel)*, 2024.
- [118] A. Argilovski, B. Jovanoski, and R. Minovski, "An overview of the Digital Transformation and Industry 4.0 technologies implementation frameworks," in *19th International Scientific Conference on Industrial Systems*, Faculty of Technical Sciences, 2023, pp. 34–39. doi: 10.24867/IS-2023-T1.1-7_03841.
- [119] M. Madhavan, M. A. Sharafuddin, and S. Wangtueai, "Measuring the Industry 5.0-Readiness Level of SMEs Using Industry 1.0–5.0 Practices: The Case of the Seafood Processing Industry," *Sustainability*, vol. 16, no. 5, p. 2205, Mar. 2024, doi: 10.3390/su16052205.
- [120] X. Wang, Y. Xue, J. Zhang, Y. Hong, S. Guo, and X. Zeng, "A Sustainable Supply Chain Design for Personalized Customization in Industry 5.0 Era," *IEEE Trans. Industr. Inform.*, vol. 20, no. 6, pp. 8786–8797, Jun. 2024, doi: 10.1109/TII.2024.3367038.
- [121] S. Katuu, "Management of public sector records in the digital age," Apr. 2022.
- [122] J. Vrana and R. R. Singh, "Digitization, Digitalization, Digital Transformation, and Beyond," in *Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 1–26. doi: 10.1007/978-3-030-48200-8_39-2.
- [123] C. Karabulut, "Paperless Processes and Digitalization in Foreign Trade-Scholar Press," Apr. 2020.
- [124] P. T. VINH, "Digital Transformation at Universities: Global Trends and Vietnam's Chances," 2021. doi: 10.2991/aebmr.k.211119.008.
- [125] M. Thurner and P. Glauner, "Digitalization in Mechanical Engineering," 2020, pp. 107–117. doi: 10.1007/978-3-030-41309-5_9.
- [126] A. Schumacher, W. Sihm, and S. Erol, "Automation, digitization and digitalization and their implications for manufacturing processes," in *Innovation and Sustainability International Scientific Conference. Sustainable Innovative Solutions 2nd Edition*, Bucharest, Romania, Nov. 2016.
- [127] L. Lachvajderová and J. Kádárová, "DIGITIZATION, DIGITALIZATION AND DIGITAL TRANSFORMATION IN INDUSTRY - A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW," in *DOKBAT 2021 - 17th International Bata Conference for Ph.D. Students and Young Researchers*, Tomas Bata University in Zlín, 2021, pp. 298–309. doi: 10.7441/dokbat.2021.25.
- [128] Z. Kovacic *et al.*, "The twin green and digital transition: High-level policy or science fiction?," *Environ. Plan. E Nat. Space*, vol. 7, no. 6, pp. 2251–2278, Dec. 2024, doi: 10.1177/25148486241258046.
- [129] Y. Javadi, "7 Pillars of Digital Transformation Framework for Continuous Business Growth," *iBusiness*, vol. 14, no. 03, pp. 139–149, 2022, doi: 10.4236/ib.2022.143011.
- [130] D. Sharon and V. Aggarwal, "Conceptual Paper on Digital Transformation and Digital Maturity," *International Journal of Research and Analytical Reviews*, 2019, [Online]. Available: <http://ijrar.com/>
- [131] Y. Kaya and F. T. Bozbura, "Digital Transformation: A Cognitive Study for Organizations to Shape their Journeys," *International Journal of Professional Business Review*, vol. 8, no. 5, p. e01825, May 2023, doi: 10.26668/businessreview/2023.v8i5.1825.
- [132] D. S. Fisher, "Unfreezing and Refreezing the Digital Mindset of Businesses," *International Journal of Innovative Science & Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 901–905, Apr. 2022.
- [133] Dr. S. Gupchup, "Digital Transformation In Industry," *Journal of Advanced Zoology*, pp. 132–138, Mar. 2024, doi: 10.53555/jaz.v45iS4.4171.

- [134] D. Romero, M. Flores, M. Herrera, and H. Resendez, "Five Management Pillars for Digital Transformation Integrating the Lean Thinking Philosophy," in *2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, IEEE, Jun. 2019, pp. 1–8. doi: 10.1109/ICE.2019.8792650.
- [135] Y. Javadi, "7 Pillars of Digital Transformation Framework for Continuous Business Growth," *iBusiness*, vol. 14, no. 03, pp. 139–149, 2022, doi: 10.4236/ib.2022.143011.
- [136] D. Sean Fisher, "Unfreezing and Refreezing the Digital Mindset of Businesses," *International Journal of Innovative Science & Technology*, Apr. 2022.
- [137] G. Doukidis, D. Spinellis, and C. Ebert, "Digital Transformation - A Primer for Practitioners," *IEEE Softw.*, vol. 37, no. 5, pp. 13–21, Sep. 2020, doi: 10.1109/MS.2020.2999969.
- [138] A. Gabriela Nicoleta and M. Andra, "CORPORATE STRATEGY: AN OVERVIEW," Nov. 2022.
- [139] T. Shiang Yen, R. Idrus, and U. K. Yusof, "A FRAMEWORK FOR CLASSIFYING MISFITS BETWEEN ENTERPRISE RESOURCE PLANNING (ERP) SYSTEMS AND BUSINESS STRATEGIES," 2011.
- [140] M. Turuk, "Digital strategy," *International journal of contemporary business and entrepreneurship*, vol. 1, no. 1, pp. 62–76, Jun. 2020, doi: 10.47954/ijcbe.1.1.5.
- [141] J. Morehouse and A. J. Saffer, "Digital Strategy," in *The International Encyclopedia of Strategic Communication*, Wiley, 2018, pp. 1–7. doi: 10.1002/9781119010722.iesc0062.
- [142] A. Lipsmeier, A. Kühn, R. Joppen, and R. Dumitrescu, "Process for the development of a digital strategy," *Procedia CIRP*, vol. 88, pp. 173–178, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.05.031.
- [143] K. Ris and M. Puvac, *Digital Transformation Handbook*. CRC Press, 2024.
- [144] O. Kohnke, "It's Not Just About Technology: The People Side of Digitization," in *Shaping the Digital Enterprise*, Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 69–91. doi: 10.1007/978-3-319-40967-2_3.
- [145] LexisNexis, "Universal Technology Taxonomy."
- [146] J. P. Womack and D. T. Jones, "Lean Thinking—Banish Waste and Create Wealth in your Corporation," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 48, no. 11, pp. 1148–1148, Dec. 1997, doi: 10.1038/sj.jors.2600967.
- [147] R. Balocco, A. Cavallo, A. Ghezzi, and J. Berbegal-Mirabent, "Lean business models change process in digital entrepreneurship," *Business Process Management Journal*, vol. 25, no. 7, pp. 1520–1542, Oct. 2019, doi: 10.1108/BPMJ-07-2018-0194.
- [148] A. Miqueo, M. Torralba, and J. A. Yagüe-Fabra, "Operator-centred Lean 4.0 framework for flexible assembly lines," *Procedia CIRP*, vol. 104, pp. 440–445, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.11.074.
- [149] Q. Wang and N. Bennett, "Integration of Lean Approaches to Manage a Manual Assembly System," *Open J. Soc. Sci.*, vol. 02, no. 09, pp. 226–231, 2014, doi: 10.4236/jss.2014.29038.
- [150] I. Jovanović, M. Gatić, D. Stojanović, and D. Gošnik, "Lean Transformation Success: The Role of Management and Employee Engagement," *Management: Journal of Sustainable Business and Management Solutions in Emerging Economies*, Sep. 2023, doi: 10.7595/management.fon.2023.0012.
- [151] A. Salma, C. Anas, and E. H. Mohammed, "How can Top management succeed in a lean manufacturing implementation in the small and medium sized enterprises?," in *2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA)*, IEEE, Apr. 2018, pp. 176–181. doi: 10.1109/LOGISTIQUA.2018.8428287.
- [152] H. Cortes, J. Daaboul, J. Le Duigou, and B. Eynard, "Strategic Lean Management: Integration of operational Performance Indicators for strategic Lean management," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 65–70, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.07.551.
- [153] A. Noel, L. Buics, and E. Sós, "Examining Lean Management Principles in SMEs Through Empirical Data Analysis and Systematic Review," in *SMTS 2025*, Basel Switzerland: MDPI, Nov. 2025, p. 54. doi: 10.3390/engproc2025113054.
- [154] F. Romana, "Lean Management Implementation in Small and Medium Sized Companies – A Success Case Study in a Manufacturing Process," *Journal of Intercultural Management*, vol. 13, no. 1, pp. 88–121, Mar. 2021, doi: 10.2478/joim-2021-0004.

- [155] Ö. F. Yılmaz, G. Özçelik, and F. B. Yeni, “Developing a Customer Oriented Lean Production System Using Axiomatic Design and Fuzzy Value Stream Mapping,” 2020, pp. 151–168. doi: 10.1007/978-3-030-42188-5_9.
- [156] M. Höök and L. Stehn, “Lean principles in industrialized housing production: The need for a cultural change,” *Lean Construction Journal*, 2008.
- [157] P. Hines and N. Rich, “Outsourcing competitive advantage: the use of supplier associations,” *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 28, no. 7, pp. 524–546, Oct. 1998, doi: 10.1108/09600039810247489.
- [158] R. Petrinska Labudovikj, R. Minovski, B. Jovanoski, and A. Kochov, “Perspectives on lean implementation challenges and potentials in higher education institutions: insights from South-East Europe (SEE),” *International Journal of Lean Six Sigma*, vol. 17, no. 3, pp. 998–1024, Apr. 2026, doi: 10.1108/IJLSS-12-2024-0254.
- [159] R. Meran, A. John, O. Roenpage, and C. Staudter, *Six Sigma+Lean Toolset*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-35882-1.
- [160] S. Kaur, N. Sharma, and G. S. Matharou, “Lean Manufacturing Tool and Techniques in Process Industry,” *International journal of scientific research and review*, Mar. 2012.
- [161] M. L. . George, *The lean Six Sigma pocket toolbox : a quick reference guide to nearly 100 tools for improving process quality, speed, and complexity*. McGraw-Hill, 2005.
- [162] A. Surya, R. Kumar, and R. Trehan, “Application of Lean Manufacturing Using Kaizen Analysis: A Case Study,” *Journal of Graphic Era University*, pp. 125–146, May 2024, doi: 10.13052/jgeu0975-1416.1218.
- [163] H. Shafeek, H. Bahaitham, and H. Soltan, “Lean Manufacturing Implementation Using Standardized Work,” *J. Comput. Theor. Nanosci.*, vol. 15, no. 6, pp. 1814–1817, Jun. 2018, doi: 10.1166/jctn.2018.7316.
- [164] A. Saenagri, O. Usman, and G. Ishak, “Implementation of Total Productive Maintenance and Lean Manufacturing in the Pharmaceutical Industry: An Empirical Study,” *Journal of Business and Management Studies*, vol. 5, no. 3, pp. 114–124, Jun. 2023, doi: 10.32996/jbms.2023.5.3.10.
- [165] N. A. A. Rahman, S. M. Sharif, and M. M. Esa, “Lean Manufacturing Case Study with Kanban System Implementation,” *Procedia Economics and Finance*, vol. 7, pp. 174–180, 2013, doi: 10.1016/S2212-5671(13)00232-3.
- [166] A. Sanders, C. Elangeswaran, and J. Wulfsberg, “Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing,” *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 9, no. 3, p. 811, Sep. 2016, doi: 10.3926/jiem.1940.
- [167] R. Saxby, M. Cano-Kourouklis, and E. Viza, “An initial assessment of Lean Management methods for Industry 4.0,” *The TQM Journal*, vol. 32, no. 4, pp. 587–601, Jul. 2020, doi: 10.1108/TQM-12-2019-0298.
- [168] A. Pereira, J. Dinis-Carvalho, A. Alves, and P. Arezes, “How Industry 4.0 can enhance Lean practices,” *FME Transactions*, vol. 47, no. 4, pp. 810–822, 2019, doi: 10.5937/fmet1904810P.
- [169] E. Vasileska, A. Argilovski, M. Tomov, B. Jovanoski, and V. Gecevska, “Implementation of Machine Learning for Enhancing Lean Manufacturing Practices for Metal Additive Manufacturing,” *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 71, pp. 14836–14845, 2024, doi: 10.1109/TEM.2024.3459645.
- [170] C. Roser, “Lean and Industry 4.0,” www.allaboutlean.com.
- [171] A. Argilovski, B. Jovanoski, R. Minovski, and A. Musliji, “Mapping the current research on the different viewpoints regarding relationship between Lean and Industry 4.0,” in *8th International Conference on Industrial Engineering*, 2022.
- [172] M. Rahman, A. Desalegn Fentaye, V. Zaccaria, I. Aslanidou, E. Dahlquist, and K. Kyprianidis, “A Framework for Learning System for Complex Industrial Processes,” in *AI and Learning Systems - Industrial Applications and Future Directions*, IntechOpen, 2021. doi: 10.5772/intechopen.92899.
- [173] A. Argilovski, R. Koleva, T. Velkovski, B. Jovanoski, and D. Babunski, “INTEGRATION OF LEAN PRINCIPLES AND AUTOMATION FOR DIGITAL TRANSFORMATION IN MANUFACTURING,”

- Mechanical Engineering-Scientific Journal*, vol. 43, no. 2, p. 75, Dec. 2025, doi: 10.55302/MESJ2543275a.
- [174] S. Partelow, “What is a framework? Understanding their purpose, value, development and use,” *J. Environ. Stud. Sci.*, vol. 13, no. 3, pp. 510–519, Sep. 2023, doi: 10.1007/s13412-023-00833-w.
- [175] C.-A. Domínguez-Báez *et al.*, “A Methodological Process for the Design of Frameworks Oriented to Infotainment User Interfaces,” *Sustainability*, vol. 13, no. 11, p. 5982, May 2021, doi: 10.3390/su13115982.
- [176] K. Peffers, T. Tuunanen, M. A. Rothenberger, and S. Chatterjee, “A design science research methodology for information systems research,” *Journal of Management Information Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 45–77, Jan. 2007.
- [177] A. T. Hailu, “The role of university–industry linkages in promoting technology transfer: implementation of triple helix model relations,” *J. Innov. Entrep.*, vol. 13, no. 1, p. 25, Apr. 2024, doi: 10.1186/s13731-024-00370-y.
- [178] J. Denning and K. Liyanage, “Systematic Literature Review of Industry 4.0 Implementation Frameworks Focusing on Applicability in Manufacturing SMEs,” 2022. doi: 10.3233/ATDE220559.
- [179] J. Butt, “A Strategic Roadmap for the Manufacturing Industry to Implement Industry 4.0,” *Designs (Basel)*, vol. 4, no. 2, p. 11, May 2020, doi: 10.3390/designs4020011.
- [180] B. Gajdzik, S. Grabowska, and S. Saniuk, “A Theoretical Framework for Industry 4.0 and Its Implementation with Selected Practical Schedules,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 4, p. 940, Feb. 2021, doi: 10.3390/en14040940.
- [181] S. Mittal, M. A. Khan, J. K. Purohit, K. Menon, D. Romero, and T. Wuest, “A smart manufacturing adoption framework for SMEs,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 5, pp. 1555–1573, Mar. 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1661540.
- [182] K. Kouveliotis Frsa *et al.*, *The Meta-Globalisation Era: Challenges and Perspectives*. Berlin, Germany: Berlin School of Business and Innovation, 2023.
- [183] W. Varalda and Í. S. Vega, “Hermeneutical Elicitation of Requirements: A Technical Perspective to Improve the Conception of the Software Requirements,” *Journal of Computer and Communications*, vol. 06, no. 09, pp. 132–149, 2018, doi: 10.4236/jcc.2018.69010.
- [184] E. Pessl, “Roadmap Industry 4.0 – Implementation Guideline for Enterprises,” *International Journal of Science, Technology and Society*, vol. 5, no. 6, p. 193, 2017, doi: 10.11648/j.ijsts.20170506.14.
- [185] Jon Garcia, “Common pitfalls in transformations: A conversation with Jon Garcia,” Mar. 2022.
- [186] “WESTERN BALKANS DIGITAL ECONOMY AND SOCIETY INDEX,” 2024.
- [187] L. Schreiber, “European Innovation Scoreboard 2025 - Country profile North Macedonia ,” Brussels, 2025.
- [188] “Industrial production (volume) index overview,” 2025.
- [189] A. Schumacher, S. Erol, and W. Sihn, “A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises,” *Procedia CIRP*, vol. 52, pp. 161–166, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.07.040.
- [190] S. Wanqing, “Project Management,” *Control and Systems Engineering*, vol. 1, no. 1, Jun. 2018, doi: 10.18063/cse.v1i1.485.
- [191] Project Management Institute, *Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) - Seventh Edition and The Standard for Project Management*, 6th ed. Project Management Institute , 2017.
- [192] A. Kochov and A. Argilovski, “Case Study: Six Sigma Project for Reducing Manual Handling of Materials in Real Manufacturing Company,” *Tehnički glasnik*, vol. 14, no. 4, pp. 499–506, Dec. 2020, doi: 10.31803/tg-20201002115534.
- [193] T. Hess, C. Matt, A. Benlian, and F. Wiesböck, “Options for Formulating a Digital Transformation Strategy.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/291349362>
- [194] C. Matt, T. Hess, and A. Benlian, “Digital Transformation Strategies,” *Business & Information Systems Engineering*, vol. 57, no. 5, pp. 339–343, Oct. 2015, doi: 10.1007/s12599-015-0401-5.
- [195] Shadrack Katuu, “Digitization and the path to digital transformation,” 2024.

- [196] F. Masri, T. Wood-Harper, and P. Kawalek, "Systems Thinking: Analysis of Electronic Patient Records Implementation and Knowledge Transfer Practice. BP Trust in the UK, NHS," *International Journal Of Management and Applied Research*, vol. 4, no. 2, pp. 105–121, Feb. 2017, doi: 10.18646/2056.42.17-009.
- [197] V. Hema, S. Thota, S. Naresh Kumar, C. Padmaja, C. B. Rama Krishna, and K. Mahender, "Scrum: An Effective Software Development Agile Tool," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 981, no. 2, p. 022060, Dec. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/981/2/022060.
- [198] X. Brioso, "Integrating ISO 21500 Guidance on Project Management, Lean Construction and PMBOK," *Procedia Eng.*, vol. 123, pp. 76–84, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.10.060.
- [199] L. M. Monday, "Define, Measure, Analyze, Improve, Control (DMAIC) Methodology as a Roadmap in Quality Improvement," *Global Journal on Quality and Safety in Healthcare*, vol. 5, no. 2, pp. 44–46, May 2022, doi: 10.36401/JQSH-22-X2.
- [200] K. B. Bsbj and N. M. Cuong, *The Meta-Globalisation Era: Challenges and Perspectives*. 2023. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/372103547>
- [201] Dr. A. Chandratreya, "Digital Transformation Strategy and Management," *INTERANTIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH IN ENGINEERING AND MANAGEMENT*, vol. 08, no. 10, pp. 1–5, Oct. 2024, doi: 10.55041/IJSREM38058.
- [202] G. Wolf, "New Challenges of the Digital Transformation: The Comeback of the Vision-Mission System," 2017, pp. 113–128. doi: 10.1007/978-3-319-41845-2_9.
- [203] J. Dhlamini, "Setting the strategic direction: the role of the mission, vision, values statements and strategic leadership," *Journal of Strategy and Management*, vol. 18, no. 3, pp. 591–615, Oct. 2025, doi: 10.1108/JSMA-08-2024-0193.
- [204] Hendra Halim, T. Meldi Kesuma, and M. Ridha Siregar, "Digital Transformation Strategy to Optimize Company Performance," *Jurnal Manajemen Bisnis, Akuntansi dan Keuangan*, vol. 2, no. 2, pp. 189–200, Nov. 2023, doi: 10.55927/jambak.v2i2.7022.
- [205] M. Pacolli, "Importance of Change Management in Digital Transformation Sustainability," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 39, pp. 276–280, 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.12.034.
- [206] G. Yilmaz and G. Gurkan Inan, "Designing a Digital Transformation Roadmap for Organisations," in *Digital Transformation*, London: Routledge India, 2025, pp. 29–46. doi: 10.4324/9781003626640-4.
- [207] M. Wildan Zulfikar, A. Idham bin Hashim, H. Ubaid bin Ahmad Umri, and A. R. Ahmad Dahlan, "A Business Case for Digital Transformation of a Malaysian-Based University," in *2018 International Conference on Information and Communication Technology for the Muslim World (ICT4M)*, IEEE, Jul. 2018, pp. 106–109. doi: 10.1109/ICT4M.2018.00028.
- [208] A. M. Zada, J. S. Persson, and P. A. Nielsen, "Roadmapping in the Digital Transformation Literature," 2022, pp. 35–50. doi: 10.1007/978-3-031-20706-8_3.
- [209] M. Verma, "Cyber-Physical Systems: Bridging the Digital and Physical Realms for a Smarter Future," *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, Nov. 2023.
- [210] C. Botto *et al.*, "Augmented Reality for the Manufacturing Industry: The Case of an Assembly Assistant," in *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, IEEE, Mar. 2020, pp. 299–304. doi: 10.1109/VRW50115.2020.00068.
- [211] R. Rai, M. K. Tiwari, D. Ivanov, and A. Dolgui, "Machine learning in manufacturing and industry 4.0 applications," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 59, no. 16, pp. 4773–4778, Aug. 2021, doi: 10.1080/00207543.2021.1956675.
- [212] D. K. Banerjee, A. K. Lnu, and K. Sharma, "AI Enhanced Predictive Maintenance for Manufacturing System," *International Journal of Research and Review Techniques*, Feb. 2024.
- [213] M. P. Zimmer, J. Järveläinen, B. C. Stahl, and B. Mueller, "Responsibility of/in digital transformation," *Journal of Responsible Technology*, vol. 16, p. 100068, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jrt.2023.100068.
- [214] E. Artemenko, "The roles of top management in digital transformation," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 940, no. 1, p. 012014, Sep. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/940/1/012014.

- [215] L. Rakovic, S. Maric, L. Djordjevic Milutinovic, V. Vukovic, and R. Bjekic, "The role of leadership in managing digital transformation: A systematic literature review," *E+M Ekonomie a Management*, vol. 27, no. 2, pp. 87–107, 2024, doi: 10.15240/tul/001/2024-2-006.
- [216] M. S. Ullah Khan, "Performance Measurement in the Digital Era: Review Literature at the Intersection of Management Accounting, Big Data Analytics and Emerging Technologies' Impact on Performance Evaluation," *International Journal of Research and Scientific Innovation*, vol. XI, no. VIII, pp. 94–101, 2024, doi: 10.51244/IJRSI.2024.1108009.
- [217] K. Zhang, "Evaluating Return on Investment for Digital Technology Investments in Multinational Corporations," *Business Inform*, vol. 7, no. 558, pp. 247–253, 2024, doi: 10.32983/2222-4459-2024-7-247-253.
- [218] L. Canina and M. Orero Blat, "A practical tool to measure digital competences: Teamschamp," *International Journal of Services Operations and Informatics*, vol. 11, no. 1, p. 1, 2021, doi: 10.1504/IJSOI.2021.10034345.
- [219] G. Vossen, J. Everding, N. Grohmann, and S. Dillon, "Assessing Levels of Digital Maturity Through a Digitalization Check," Aug. 2022.
- [220] S. Maydanova, I. Ilin, C. Jahn, A.-K. Lange, and V. Korablev, "Balanced Scorecard for the Digital Transformation of Global Container Shipping Lines," in *Proceedings of the International Conference on Digital Technologies in Logistics and Infrastructure (ICDTLI 2019)*, Paris, France: Atlantis Press, 2019. doi: 10.2991/icdtli-19.2019.72.
- [221] T. Heinemann, P. Schraml, S. Thiede, C. Eisele, C. Herrmann, and E. Abele, "Hierarchical Evaluation of Environmental Impacts from Manufacturing System and Machine Perspective," *Procedia CIRP*, vol. 15, pp. 141–146, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.06.063.
- [222] A. Bala and A. Koxhaj, "Key Performance Indicators (KPIs) in the Change Management of Public Administration," *European Scientific Journal, ESJ*, vol. 13, no. 4, p. 278, Feb. 2017, doi: 10.19044/esj.2017.v13n4p278.
- [223] I. del Arco, Ó. Flores-Alarcia, J. Balladares, and G. Quintero, "Assessing digital competencies: A self-evaluation approach for university students' academic success," *J. Educ. Elearn. Res.*, vol. 12, no. 3, pp. 439–448, Aug. 2025, doi: 10.20448/jeelr.v12i3.7322.
- [224] S. Abdullah, B. Baharuddin, and A. N. Tanal, "Effectiveness of Digital Training for Educational Staff in Management Information Systems," *International Journal of Asian Education*, vol. 6, no. 1, pp. 141–150, Mar. 2025, doi: 10.46966/ijae.v6i1.475.
- [225] G. S. Banu, "Measuring innovation using key performance indicators," *Procedia Manuf.*, vol. 22, pp. 906–911, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.03.128.
- [226] E. Baranova, "IMPROVING EFFICIENCY OF PERSONNEL MOTIVATION SYSTEM ON THE BASIS OF KPI PROGRAM IMPLEMENTATION - Drive," *Actual directions of scientific researches of the XXI century: theory and practice*, vol. 12, no. 3, pp. 70–84, Nov. 2024, doi: 10.34220/2308-8877-2024-12-3-70-84.
- [227] A. . Ahmed, George. Siantonas, and Nicholas. Siantonas, *The 13 key performance indicators for highly effective teams*. Routledge, 2017.
- [228] bdc, "Digital maturity assessment."
- [229] VDMA, "IMPULS - Industry 4.0 Readiness ."
- [230] D. J. Webber, E. Hughes, G. Pacheco, and G. Parry, "Investment in digital infrastructure: Why and for whom?," *REGION*, vol. 9, no. 1, pp. 147–163, Jun. 2022, doi: 10.18335/region.v9i1.415.
- [231] J. Maire, V. Bronet, and M. Pillet, "A typology of 'best practices' for a benchmarking process," *Benchmarking: An International Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 45–60, Feb. 2005, doi: 10.1108/14635770510582907.
- [232] B. Krishnamoorthy, C. D', and N. A. Lima, "Benchmarking as a measure of competitiveness," *International Journal of Process Management and Benchmarking*, vol. 4, no. 3, p. 342, 2014, doi: 10.1504/IJPMB.2014.063240.

- [233] G. A. Prastiantomo, T. H. Saputra, and A. Wijayanto, “A Study on Relaxation Learning Factory in Vocational Higher Education During the covid-19 Endemic Transition,” *Buletin Poltanesa*, vol. 24, no. 1, Jun. 2023, doi: 10.51967/tanesa.v24i1.2651.
- [234] J. Massa and E. Lutters, “Guiding the Design of Effective Learning Factories: Requirements of a Design Approach for Resilience,” 2024, pp. 145–152. doi: 10.1007/978-3-031-65400-8_17.
- [235] E. Abele, J. Metternich, and M. Tisch, *Learning Factories*. Cham: Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-92261-4.
- [236] L. Zhu, C. Johnsson, M. Varisco, and M. M. Schiraldi, “Key performance indicators for manufacturing operations management – gap analysis between process industrial needs and ISO 22400 standard,” *Procedia Manuf.*, vol. 25, pp. 82–88, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.06.060.
- [237] K. S. Chen and M. L. Huang, “Performance measurement for a manufacturing system based on quality, cost and time,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 44, no. 11, pp. 2221–2243, Jun. 2006, doi: 10.1080/00207540500446360.
- [238] R. Meran, A. John, O. Roenpage, and C. Staudter, *Six Sigma+Lean Toolset*. in Management for Professionals. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-35882-1.
- [239] F. Haddadi and T. Yaghoobi, “Key indicators for organizational performance measurement,” *Management Science Letters*, vol. 4, no. 9, pp. 2021–2030, 2014, doi: 10.5267/j.msl.2014.8.019.
- [240] K. Kushariyadi, D. A. Wahid, M. F. Albashori, I. Rustiawan, A. ARDENNY, and W. Wahyudiyono, “Performance Management Based on Key Performance Indicators (KPI) to improve Organizational Effectiveness,” *Maneggio*, vol. 2, no. 1, pp. 90–102, Feb. 2025, doi: 10.62872/7yx54j15.
- [241] W. Viechtbauer *et al.*, “A simple formula for the calculation of sample size in pilot studies,” *J. Clin. Epidemiol.*, vol. 68, no. 11, pp. 1375–1379, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.jclinepi.2015.04.014.
- [242] J. Li, D. E. Blumenfeld, N. Huang, and J. M. Alden, “Throughput analysis of production systems: recent advances and future topics,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 47, no. 14, pp. 3823–3851, Jul. 2009, doi: 10.1080/00207540701829752.
- [243] D. Napitupulu *et al.*, “Analysis of Student Satisfaction Toward Quality of Service Facility,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 954, p. 012019, Jan. 2018, doi: 10.1088/1742-6596/954/1/012019.

СПИСОК СО ПРИЛОЗИ

Прилог 1: Класификација на трудовите за специфичните активности

Прилог 2: Семинарски труд - Методи за верификација на рамката за имплементација на дигитална трансформација во производството

Прилог 3: Евалуација на рамката за дигитална трансформација

Прилог 4: Упатство за монтажа

Прилог 5: Производствени сценарија

Прилог 6: Податоци по сценарио

Прилог 7: Резултати од анкета за дигитална култура

Прилог 8: Збирна табела со показатели