

Model izračuna čimbenika spremnosti za industriju 4.0 usmjerenoga na projektiranje tehnoloških procesa

Trstenjak, Maja

Doctoral thesis / Disertacija

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:330072>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-17**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Maja Trstenjak

**MODEL IZRAČUNA ČIMBENIKA
SPREMNOSTI ZA INDUSTRIJU 4.0
USMJERENOGA NA PROJEKTIRANJE
TEHNOLOŠKIH PROCESA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2021.



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Maja Trstenjak

**MODEL IZRAČUNA ČIMBENIKA
SPREMNOSTI ZA INDUSTRIJU 4.0
USMJERENO NA PROJEKTIRANJE
TEHNOLOŠKIH PROCESA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:
doc.dr.sc. Tihomir Opetuk

Zagreb, 2021.



University of Zagreb

Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture

Maja Trstenjak

A MODEL FOR CALCULATING THE PROCESS PLANNING ORIENTED INDUSTRY 4.0 READINESS FACTOR

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:
Tihomir Opetuk, PhD

Zagreb, 2021

Podaci za bibliografsku karticu

UDK	658.5
Ključne riječi	projektiranje tehnoloških procesa, industrija 4.0, analitički hijerarhijski proces, multikriterijsko optimiranje, digitalizacija, CAPP
Znanstveno područje	Tehničke znanosti
Znanstveno polje	Strojarstvo
Institucija	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
Mentor	doc.dr.sc. Tihomir Opetuk
Broj stranica	246
Broj slika	81
Broj tablica	37
Broj korištenih bibliografskih izvora	111
Datum obrane	5.3.2021.
Povjerenstvo	izv.prof.dr.sc. Hrvoje Cajner doc.dr.sc. Miro Hegedić prof.dr.sc. Goran Šimunović (<i>Sveučilište u Slavonskom Brodu, Strojarški fakultet u Slavonskom Brodu</i>)
Institucija u kojoj je rad pohranjen	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Nacionalna i sveučilišna knjižnica u Zagrebu

Zahvala

Hvala mami i tati za najveću, bezuvjetnu ljubav, podršku i ohrabrenje.

Hvala nećaku Dinku koji mi je #objasnio kako rade strojevi.

Hvala Đurđici, Sanji i Ines.

Hvala Ani i Klaudiji.

Hvala Ivani, Nataši, Luki i Davoru.

Hvala Brkovima, Edi Maajki, Dubiozi kolektiv i Mireli Priselac Remi.

Hvala studijskom savjetniku, prof.dr.sc. Predragu Ćosiću, koji mi je dao priliku da se bavim znanošću i uveo u područje projektiranja proizvodnje.

Hvala mentoru doc.dr.sc. Tihomiru Opetuku i doc.dr.sc. Hrvoju Cajneru na pomoći oko izrade doktorata.

Hvala drugovima prof.dr.sc. Danijelu Pavkoviću i prof.dr.sc. Davoru Zorcu.

Hvala prof.dr.sc. Dragutinu Lisjaku na podršci.

Hvala članovima komisije doc.dr.sc. Miri Hegediću i prof.dr.sc. Goranu Šimunoviću na savjetima.

Hvala svima koji su sudjelovali u anketama.

#maja2020

Sažetak

Koncept Industrije 4.0 čine integrirani alati kako bi se stvorila fleksibilna proizvodnja s visokim stupnjem autonomnosti. Digitalizacija, kao dio koncepta Industrije 4.0 je ključan dio prilagodbe trendovima na tržištu za održanje konkurentnosti tvrtki. To je viša razina informatičkih znanja i investicija, na koje male i srednje tvrtke često nisu spremne dok s druge strane njihovi veći konkurenti započinju s implementacijom koncepta te tako povećavaju prednost na tržištu. U okviru ove disertacije poseban naglasak je stavljen na projektiranje tehnoloških procesa, za koji je razvijen izračuna čimbenika spremnosti (eng. *readiness factor*) za prihvatanje koncepta Industrije 4.0 pomoću metoda višekriterijskog odlučivanja i optimiranja. Budući da se radi o evaluaciji trenutnog stanja na temelju različitih kriterija, sustavi za potporu odlučivanju prepoznati su kao jedan od alata. Izračun čimbenika spremnosti tvrtki pomaže u definiciji optimalnog strateškog plana ka prihvatanju koncepta Industrije 4.0, što je od neizmjerne važnosti zbog izazova koji nosi implementacija koncepta. Model za izračun čimbenika spremnosti proveden je pomoću metode analitičkog hijerarhijskog procesa, verificiran je analizom osjetljivosti, potvrđen simulacijom i primijenjen na studiji slučaja u tvrtki iz ciljane grupe.

Ključne riječi: projektiranje tehnoloških procesa, industrija 4.0, analitički hijerarhijski proces, multikriterijsko optimiranje, digitalizacija, CAPP

Summary

Industry 4.0 concept is based on integrated tools in order to create flexible and highly autonomous manufacturing. Digitization, as part of the Industry 4.0 concept, is a key part of adapting to market trends to maintain competitiveness. This is a higher level of IT knowledge and investment, to which small and medium-sized companies are often not ready for, while, on the other hand, their larger competitors have already started implementing the concept and thus increase their market advantage. In this dissertation, special emphasis will be placed on the design of technological processes, for which a Industry 4.0 readiness factor calculation model using multicriteria decision-making and optimization methods will be developed. Nature of this problem is evaluation of the current situation based on different criteria, so decision support systems have been identified as one of the tools. The calculation of the company's readiness factor helps to define an optimal strategic plan towards the acceptance of the Industry 4.0 concept, which is of immense importance due to the challenges posed by the implementation of the concept. The model for readiness factor calculation was developed by use of analytic hierarchical process method, verified by sensitivity analysis, confirmed by simulation and applied in a case study.

Key Words: process planning, Industry 4.0, analytic hierarchy process, multi-criteria optimization, digitization, CAPP

Extended summary

The doctoral dissertation "A Model for Calculating the Process Planning Oriented Industry 4.0 Readiness Factor" consists of 9 chapters.

Chapter 1 gives a description of the concept of Industry 4.0 and a brief description of the issues, in terms of motivation for work, which will be addressed in the dissertation.

Chapter 2 provides a review of the literature, a statistical review of published papers in the field of Industry 4.0, process planning and calculation of readiness factors in the period from 2011 to 2019 in the most relevant scientific databases Web of Science and Scopus. Papers in the field of calculation of readiness factors, which are classified into two categories - commercial and scientific approach, are considered in more detail. An scientific gap has been identified in the area ton process planning in the environment of Industry 4.0 and the calculation of readiness factor.

Based on the previously presented findings, **Chapter 3** presents the research plan, defines the research objectives, sets the hypothesis and the scientific contribution.

Chapter 4 describes in more detail the concept of Industry 4.0, its historical development, features and importance. The computer tools used in process planning are described - CAD (Computer-aided Design), CAM (Computer-aided Manufacturing) and CAPP (Computer-aided Process Planning). The concept of CAPP system, division into different types, its principle of work and application are explained. The theoretical bases of the Manufacturing Automation system (MAS) and Flexible production systems (FMS) are also described, with their structure, components, application in planning and control, with advantages and limitations.

Additionally, chapter describes the synergy of hardware and software components (cyber-physical systems) in Industry 4.0, RFID (Radio-frequency identification) technology that uses radio frequency to exchange information between portable devices/memory and host computers systems and the digital twin. It also gives the relation between the process planning and industry 4.0, compares the traditional and modern approach, defines the ideal model of "smart process planning" system developed according to the elements of Industry 4.0 that will further serve as a reference value, ie target state in calculating readiness factor.

Chapter 5 provides a theoretical setup of decision support systems and individual methods of multi-criteria decision-making and optimization, namely analytical hierarchical process, TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), PROMETHEE (Preference ranking organization method for enrichment evaluation) and ELECTRE

(ELimination Et Choice Translating REality). The methods were compared with each other and it was concluded that an Analytical Hierarchical Process will be used in the development of the model for calculating the readiness factor.

Chapter 6 contains the structure and results of the preliminary research on the current state of process planning in Croatian companies. The target group includes companies engaged in metal machining due to the imperative of having a process planning department in their organization. The results came from 34 companies and examined the impact of company size, familiarity with Industry 4.0 and the level of education of respondents on the applied type of process planning and other infrastructural and organizational components within the company.

Chapter 7 describes the development and implementation of a model for calculating a company readiness factor oriented on process planning. Based on the literature and the theoretical setup of process planning in Industry 4.0, three groups of criteria were developed - "Smart process planning", "Infrastructure" and "Organization and human resources". Each individual criterion within the group is one element of Industry 4.0 that needs to be implemented when accepting a new concept. An expert group of 30 experts from the field, 15 from practice and 15 from science, was formed who assessed the given elements based on five criteria - impact on increasing productivity, quality, complexity of performance and application, financial investment readiness and expected return on investment. The results were ranked by a statistical method that is part of the Friedman test and weights were calculated for each individual criterion within the group. The Analytical Hierarchical Process, based on the preferences of the above five criteria of each company in which the readiness factor is calculated, the Analytical Hierarchical Process obtained the rank of criteria according to the priority of introduction. Ranks were further used as weights, alternatives became criteria, and "Ideal Status" and "Current Status" were defined as the new two alternatives. Data on the current situation were collected by a questionnaire and compared with the Analytical Hierarchical Process with the ideal, so the readiness factor was calculated. The model was verified by sensitivity analysis, confirmed by simulation and applied in a case study.

Chapter 8 is a conclusion in which the confirmation of the hypothesis, the achieved goals, the scientific contribution and the directions of future research are discussed.

Podaci o mentoru

Tihomir Opetuk rođen je 7. rujna 1984. godine u Zagrebu. Osnovnu školu završio je u Vukovini, a srednju Zrakoplovnu tehničku školu Rudofla Perešina u Velikoj Gorici. Fakultet strojarstva i brodogradnje upisao je 2003. godine. Preddiplomski studij na smjeru Industrijsko inženjerstvo i menadžment završava 2007. godine obranom završnog rada na temu: Primjena skupnih tehnologija u projektiranju tehnoloških procesa. Diplomski studij na smjeru Industrijsko inženjerstvo i menadžment završava 2008. godine obranom diplomskog rada na temu: Razvoj modela za procjenu vremena izrade rotacijskih dijelova. 2008. godine dodijeljena mu je Medalja Fakulteta za postignute uspjehe na studiju. Od kolovoza 2008. godine radi u tvrtki Končar Distributivni i specijalni transformatori d.d. kao inženjer procesa. Dvije i pol godine sudjeluje kao asistent direktora na projektu Izgradnje visoko naponskog laboratorija, montažnog pogona, skladišnih i uredskih prostora. Od veljače 2012. godine radi na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, kao asistent na Katedri za projektiranje proizvodnje, Zavoda za industrijsko inženjerstvo. Doktorski studij na smjeru Industrijsko inženjerstvo i menadžment završava 2016. godine obranom doktorskog rada na temu: Model uvođenja upravljanja zelenim lancima opskrbe.

Područja istraživanja njegova znanstvenog rada uključuju sljedeća područja: logistika, simulacije proizvodnih i logističkih procesa, projektiranje tehnoloških procesa, studij rada i ergonomija.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	11
POPIS OZNAKA	14
POPIS KRATICA	15
POPIS SLIKA	16
POPIS TABLICA.....	19
POPIS PRILOGA.....	21
1. UVOD.....	22
2. PREGLED LITERATURE.....	23
2.1. Detaljan pregled sadržaja objavljenih stručnih i znanstvenih radova	29
2.1.1. Komercijalni pristup	32
2.1.2. Znanstveni pristup.....	34
2.2. Nedostaci trenutnih saznanja	40
3. PLAN ISTRAŽIVANJA I METODA RADA.....	42
3.1. Ciljevi i hipoteza istraživanja.....	42
3.2. Očekivani znanstveni doprinos	43
4. INDUSTRIJA 4.0 I PROJEKTIRANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA.....	44
4.1. Povijesni razvoj koncepta Industrije 4.0	45
4.1.1. Podsustavi CIM-a.....	46
4.1.2. Struktura CIM-a	47
4.1.3. Informacijski sustav za upravljanje	48
4.1.4. CAD/CAPP/CAM.....	49
4.1.4.1. Funkcija CAPP-a	50
4.1.4.2. Općeniti CAPP model.....	51
4.1.4.3. Arhitektura CAPP-a	52
4.1.4.4. Prednosti korištenja CAPP sustava.....	52
4.1.4.5. Varijantni pristup CAPP-a	53
4.1.4.6. Generativni pristup CAPP.....	54
4.1.4.7. Uštede korištenjem CAPP-a	54
4.1.4.8. Primjena	54
4.1.5. Sustav za automatizaciju proizvodnje (eng. Manufacturing automation system – MAS).....	55
4.1.6. Fleksibilni proizvodni sustavi	55
4.1.7. Komponente fleksibilnih proizvodnih sustava.....	56
4.1.7.1. Dizajn i implementacija FMS-a	57
4.1.7.2. Planiranje i kontrola u FMS-u.....	57
4.1.7.3. Prednosti i ograničenja FMS-a.....	58
4.2. Industrija 4.0 – hardver i softver – kibernetičko-fizički sustavi.....	59
4.2.1. Dizajn kibernetičko-fizičkih sustava	62
4.2.1.1. Digitalni blizanac	62
4.2.1.2. Nastanak digitalnog blizanca	64
4.3. Projektiranje tehnoloških procesa	65

4.3.1.	Tradicionalni pristup	66
4.3.2.	Računalni program za projektiranje tehnoloških procesa „ProPlanner“	66
4.3.3.	ISOS – genetski algoritam	67
4.3.4.	Problem putujućeg trgovca – SAT algoritam	68
4.3.5.	SA algoritam	68
4.4.	Projektiranje tehnoloških procesa u Industriji 4.0	69
4.4.1.	Okvir razvoja projektiranja tehnoloških procesa sukladno industrijskim revolucijama.....	69
4.4.2.	Pametno projektiranje tehnoloških procesa (PPTP).....	70
4.4.2.1.	Mogućnosti implementacije.....	75
5.	SUSTAVI ZA VIŠEKRITERIJSKO ODLUČIVANJE I OPTIMIRANJE.....	76
5.1.	Povijest DSS-a [92].....	76
5.2.	Vrste DSS-a.....	78
5.2.1.	DSS zasnovan na modelu.....	78
5.2.2.	DSS zasnovan na dokumentima.....	79
5.2.3.	DSS zasnovan na znanju	79
5.2.4.	DSS zasnovan na podacima	80
5.2.5.	DSS zasnovan na komunikacijama	80
5.2.6.	DSS zasnovan na internetskoj aplikaciji	80
5.3.	Višekriterijski pristup.....	81
5.3.1.	Višekriterijska metoda odlučivanja TOPSIS	82
5.3.2.	Višekriterijska metoda odlučivanja ELECTRE	82
5.3.3.	Višekriterijska metoda odlučivanja PROMETHEE.....	82
5.4.	Analitički hijerarhijski proces (AHP metoda)	83
5.4.1.	Postupak.....	84
5.4.1.1.	Strukturiranje problema	84
5.4.2.	Saatyjeva skala.....	84
5.4.3.	Određivanje najznačajnijeg kriterija i alternativa	86
5.5.	Prednosti i nedostaci AHP metode.....	86
5.5.1.	Prednosti	86
5.5.2.	Nedostaci.....	87
5.6.	Diskusija – odabir metode.....	87
6.	PRELIMINARNO ISTRAŽIVANJE	89
6.1.	Anketa	90
6.1.1.	Prva grupa pitanja	94
6.1.2.	Druga grupa pitanja.....	94
6.1.3.	Treća grupa pitanja.....	94
6.1.3.1.	Obrada podataka	94
6.2.	Odabrani statistički testovi hipoteza: <i>Mann Whitney</i> U-test i <i>Wilcoxon</i> rank sum test	96
6.2.1.	Rezultati - procjena vremena i troškova	97
6.2.1.1.	Rezultati - korištenje CAD i CAM sustava, poznavanje CAPP sustava.....	98
6.2.1.2.	Rezultati - manipulacija velikom količinom podataka (eng. Big Data Manipulation)	100
6.2.1.3.	Rezultati - kapacitet hardvera i softvera	102
6.2.1.4.	Rezultati - horizontalna integracija.....	104
6.2.1.5.	Rezultati - utjecaj ljudskog čimbenika.....	106
6.2.2.	Prioriteti za unapređenje	107
6.2.3.	Perspektiva za unapređenje i diskusija	109

7. MODEL ZA IZRAČUN ČIMBENIKA SPREMNOSTI TVRTKE ZA INDUSTRIJU 4.0 USMJEREN NA PROJEKTIRANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA.....	113
7.1. Formiranje stabla kriterija.....	119
7.2. Model uvođenja Industrije 4.0 usmjeren na projektiranje tehnoloških procesa	122
7.3. Verifikacija modela uvođenja Industrije 4.0 usmjerenog na PTP	128
7.3.1. Analiza osjetljivosti modela uvođenja Industrije 4.0 usmjernog na PTP	128
7.3.2. Simulacija rada modela uvođenja Industrije 4.0 usmjeren na PTP.....	139
7.4. Čimbenik spremnosti	149
7.5. Studija slučaja – izračun čimbenika spremnosti	151
7.5.1. Strategija uvođenja elemenata Industrije 4.0	155
2. Infrastruktura.....	157
3.PPTP.....	157
8. ZAKLJUČAK.....	158
8.1. Ostvareni ciljevi doktorskog rada	158
8.2. Potvrda hipoteze doktorskog rada.....	160
8.3. Ostvareni znanstveni doprinos doktorskog rada	160
8.4. Buduća istraživanja	161
LITERATURA.....	162
9. PRILOZI.....	170

POPIS OZNAKA

Svi korišteni simboli i oznake objašnjene su unutar teksta na mjestu pojavljivanja.

POPIS KRATICA

AHP	Analitički hijerarhijski proces
CAD	Oblikovanje pomoću računala (eng. <i>Computer-aided Design</i>)
CAE	Računalno inženjerstvo (eng. <i>Computer-aided Engineering</i>)
CAM	Proizvodnja s pomoću računala (eng. <i>Computer-aided Manufacturing</i>)
CAPP	Računalno projektiranje tehnoloških procesa (eng. <i>Computer-aided Process Planning</i>)
CAQ	Računalno osiguranje kvalitete (eng. <i>Computer-aided Quality Assurance</i>)
CC	<i>Current Contents Connect</i>
CIM	Računalno integrirana proizvodnja (eng. <i>Computer Integrated Manufacturing</i>)
CNC	Računalno numeričko upravljanje (eng. <i>Computer Numerical Control</i>)
CPS	Kibernetско-fizički sustavi (eng. <i>Cyber-physical Systems</i>)
DSS	Sustavi za podršku pri odlučivanju (eng. <i>Decision Support Systems</i>)
ERP	Planiranje resursa tvrtke (eng. <i>Enterprise Resource Planning</i>)
ELECTRE	fr. <i>ELimination Et Choix Traduisant la REalité</i>
FMS	Fleksibilni proizvodni sustavi (eng. <i>Flexible Manufacturing Systems</i>)
I40	Industrija 4.0 (eng. <i>Industry 4.0</i>)
MAS	Sustavi za automatizaciju proizvodnje (eng. <i>Manufacturing Automation Systems</i>)
NC	Numeričko upravljanje (eng. <i>Numerical Control</i>)
PLC	Programabilni logički kontroler (eng. <i>Programmable Logic Controller</i>)
PPC	Planiranje i kontrola proizvodnje (eng. <i>Production Planning and Control</i>)
PROMETHEE	eng. <i>Preference ranking organization method for enrichment evaluation</i>
RFID	Radio-frekvencijska tehnologija identifikacije (eng. <i>Radio-frequency Identification</i>)
SA	Algoritam simuliranog žarenja (eng. <i>Simulated Annealing Algorithm</i>)
TOPSIS	Tehnika redoslijeda preferiranja prema sličnosti s idealnim rješenjem (eng. <i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>)
WOS	<i>Web of Science</i>

POPIS SLIKA

Slika 1. Objavljeni radovi u bazi Web of Science na temu „Industry 4.0“ (2011.-2019.).....	23
Slika 2. Objavljeni radovi u bazi Web of Science na temu „Smart Factory“ (2011.-2019.) ...	24
Slika 3. Objavljeni radovi u bazi Web of Science na temu „Internet of Things“ (2011.-2019.)	24
Slika 4. Objavljeni radovi u bazi Web of Science na temu „Cyber Physical Systems“ (2011.-2019.).....	25
Slika 5. Objavljeni radovi u bazi Scopus na temu „Industry 4.0“, „Smart Factory“, „Internet of Things“ i „Cyber Physical Systems“ (2011.-2019.).....	25
Slika 6. Objavljeni radovi u bazi Web of Science na temu „Proces Planning“ (2011.-2019.)	26
Slika 7. Objavljeni radovi u bazi Scopus na temu „Proces Planning“ (2011.-2019.)	27
Slika 8. Objavljeni radovi u bazi Web of Science povezani uz „Industry 4.0“ i „Proces Planning“ (2011.-2019.)	27
Slika 9. Objavljeni radovi u bazi Scopus povezani uz „Industry 4.0“ i „Proces Planning“ (2011.-2019.)	28
Slika 10. Objavljeni radovi u bazi Web of Science povezani uz „Industry 4.0“ i „Readiness Factor“ (2011.-2019.)	29
Slika 11 Udio pojedinih područja interesa u objavljenim radovima povezanim s izračunom čimbenika spremnosti za Industriju 4.0.....	40
Slika 12 Struktura CIM-a [59]	48
Slika 13 Klasifikacija CAPP sustava [64].....	50
Slika 14 CAPP model [66]	51
Slika 16 Planiranje i kontrola u FMS-u [79]	58
Slika 17 Struktura CPS-a [80]	60
Slika 18 RFID princip rada [81].....	61
Slika 19 Digitalni blizanac – ilustracija sustava [84]	63
Slika 20 Shema ProPlanner sustava [87].....	67
Slika 21 Razvoj PTP-a prema industrijskim revolucijama	70
Slika 22 Koncept Pametnog projektiranja tehnoloških procesa (PPTP-a) [91]	72
Slika 23 Struktura PPTP-a [91]	73
Slika 25 Strukturiranje problema AHP metode [98]	84
Slika 26 Saatyjeva skala relativne važnosti [100]	85
Slika 27 Saatyjeva skala – značenje pojedinih vrijednosti [98]	85
Slika 29 Procjena vremena izrade i troškova	97
Slika 30 Korištenje CAD softvera.....	99
Slika 31 Korištenje CAM softvera	99
Slika 32 Poznavanje CAPP sustava	100
Slika 33 Razvoj i prisutnost baza podataka.....	101
Slika 34 Prediktivna analitika i strojno učenje	102
Slika 35 Evaluacija softvera	103
Slika 36 Evaluacija hardvera	104
Slika 37. Horizontalna integracija	105
Slika 38 Utjecaj ljudskog čimbenika.....	106
Slika 39 Model izračuna čimbenika spremnosti usmjeren na projektiranje tehnoloških procesa	114
Slika 40 Matrica prioriteta ciljeva tvrtke.....	115

Slika 41 Struktura modela uvođenja pojedinih modela Industrije 4.0 usmjerenih na PTP....	116
Slika 42 Povezanost čimbenika spremnosti i stadija razvoja PTP-a.....	118
Slika 43 Opcija <i>Performance</i> testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a	130
Slika 44 Opcija <i>Dynamic</i> testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a.....	131
Slika 45 Opcija <i>Gradient</i> testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a po kriteriju povećanja produktivnosti	132
Slika 46 Opcija <i>Gradient</i> testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a po kriteriju spremnosti financijskog ulaganja	133
Slika 47 Opcija <i>Gradient</i> testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a po kriteriju složenosti izvedbe i primjene	134
Slika 48 Opcija <i>Gradient</i> testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a po kriteriju očekivanog vremena povrata investicije	135
Slika 49 Opcija <i>Gradient</i> testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a po kriteriju povećanja kvalitete	136
Slika 50 Opcija <i>dynamic</i> testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a nakon promjene ulaznih podataka za otprilike 5 %	138
Slika 51 Matrica prioriteta za tvrtku 1	140
Slika 53 Matrica prioriteta za tvrtku 3	140
Slika 55 Polarni graf iznosa vektora prioriteta za sve 4 tvrtke.....	142
Slika 56 Usporedba elemenata Industrije 4.0 modela uvođenja "pametnog projektiranja tehnoloških procesa" za sve četiri tvrtke	144
Slika 57 Usporedba elemenata Industrije 4.0 modela uvođenja "infrastrukture" za sve četiri tvrtke.....	146
Slika 58 Usporedba elemenata Industrije 4.0 modela uvođenja "organizacije i ljudskih resursa" za sve četiri tvrtke.....	148
Slika 59 Stablo kriterija – PPTP – studija slučaja.....	153
Slika 60 Stablo kriterija – Infrastruktura – studija slučaja	153
Slika 61 Stablo kriterija – Organizacija i ljudski resursi – studija slučaja.....	153
Slika 62 Evaluacija alternativa (eng. Direct Ratings) – case study.....	154
Slika 63 Čimbenik spremnosti – PPTP – case study.....	154
Slika 64 Čimbenik spremnosti – Infrastruktura – case study	154
Slika 65 Čimbenik spremnosti – Organizacija i ljudski resursi – case study.....	154
Slika 66 Opcija <i>gradient</i> s obzirom na kriterij „Povećanje kvalitete“ kod grupe „Organizacija i ljudski resursi“.....	216
Slika 67 Opcija <i>gradient</i> s obzirom na kriterij „Očekivano vrijeme povrata investicije“ kod grupe „Organizacija i ljudski resursi“	216
Slika 68 Opcija <i>gradient</i> s obzirom na kriterij „Spremnost financijskog ulaganja“ kod grupe „Organizacija i ljudski resursi“	216
Slika 69 Opcija <i>gradient</i> s obzirom na kriterij „Složenost izvedbe i primjene“ kod grupe „Organizacija i ljudski resursi“	216
Slika 70 Opcija <i>gradient</i> s obzirom na kriterij „Povećanje produktivnosti“ kod grupe „Organizacija i ljudski resursi“	216
Slika 71 Opcija <i>dynamic</i> grupe „Organizacija i ljudski resursi“	216
Slika 72 Opcija <i>dynamic</i> grupe „Organizacija i ljudski resursi“ – promjena za 5%.....	216
Slika 73 Opcija <i>performance</i> grupe „Organizacija i ljudski resursi“	216
Slika 74 Opcija <i>gradient</i> s obzirom na kriterij „Složenost izvedbe i primjene“ kod grupe „Infrastruktura“	216
Slika 75 Opcija <i>gradient</i> s obzirom na kriterij „Spremnost financijskog ulaganja“ kod grupe „Infrastruktura“	216

Slika 76 Opcija <i>gradient</i> s obzirom na kriterij „Povećanje kvalitete“ kod grupe „Infrastruktura“	216
Slika 77 Opcija <i>gradient</i> s obzirom na kriterij „Očekivano vrijeme povrata investicija“ kod grupe „Infrastruktura“	216
Slika 78 Opcija <i>gradient</i> s obzirom na kriterij „Povećanje produktivnosti“ kod grupe „Infrastruktura“	216
Slika 79 Opcija <i>dynamic</i> grupe „Infrastruktura“	216
Slika 80 Opcija <i>dynamic</i> grupe „Infrastruktura“ – promjena za 5%.....	216
Slika 81 Opcija <i>performance</i> grupe „Infrastruktura“	216

POPIS TABLICA

Tablica 1 Pregled metoda za izračun spremnosti tvrtke za Industriju 4.0.....	30
Tablica 2 Karakteristike objavljenih radova na temu čimbenika spremnosti za Industriju 4.0 (2011.-2019.)	37
Tablica 3 Usporedba višekriterijalnih metoda za potporu odlučivanju.....	87
Tablica 4 Ispitanici preliminarnog istraživanja	95
Tablica 5 Elementi Industrije 4.0 za rangiranje	107
Tablica 6 Ljestvica rangova elemenata Industrije 4.0 prema prioritetima	107
Tablica 7 Elementi Industrije 4.0 i njihova perspektiva.....	110
Tablica 8 Ciljevi uvođenja Industrije 4.0	119
Tablica 9 Pojavljivanje pojedinih dimenzija (kriterija) u literaturi.....	120
Tablica 11 Rangovi elemenata modela uvođenja "pametnog projektiranja tehnoloških procesa" u ovisnosti o kriterijima cilja.....	125
Tablica 12 Rangovi elemenata modela uvođenja "infrastrukture" u ovisnosti o kriterijima cilja za uvođenje I40	126
Tablica 13 Rangovi elemenata modela uvođenja "organizacije i ljudskih resursa" u ovisnosti o kriterijima cilja za uvođenje I40.....	127
Tablica 14 Usporedba redoslijeda elemenata Industrije 4.0 modela uvođenja "pametnog projektiranja tehnoloških procesa (PPTP)" za sve četiri tvrtke.....	143
Tablica 15 Usporedba redoslijeda elemenata Industrije 4.0 modela uvođenja "infrastrukture" za sve četiri tvrtke.....	145
Tablica 16 Usporedba redoslijeda elemenata Industrije 4.0 modela uvođenja "organizacije i ljudskih resursa" za sve četiri tvrtke.....	147
Tablica 17 Model uvođenja Industrije 4.0 za tvrtku	151
Tablica 18 Prioriteti važnosti grupa kriterija (dobiveni na temelju rezultata detaljnije objašnjenih u poglavlju 6.2.2)	155
Tablica 19 Strategija uvođenja elemenata Industrije 4.0 za tvrtku iz studije slučaja.....	157
Tablica 20 Mann-Whitney U-test prema poznavanju Industrije 4.0.....	187
Tablica 21 Mann-Whitney U-test prema veličini tvrtke	188
Tablica 22 Mann-Whitney U-test prema razini obrazovanja	189
Tablica 23 Skupina elemenata „Pametno projektiranje tehnoloških procesa“ prema kriteriju povećanja produktivnosti	201
Tablica 24 Skupina elemenata „Infrastruktura“ prema kriteriju povećanja produktivnosti... ..	202
Tablica 25 Skupina elemenata „Organizacija i ljudski resursi“ prema kriteriju povećanja produktivnost.....	203
Tablica 26 Skupina elemenata „Pametno projektiranje tehnoloških procesa“ prema kriteriju povećanja kvalitete	204
Tablica 27 Skupina elemenata „Infrastruktura“ prema kriteriju povećanja kvalitete	205
Tablica 28 Skupina elemenata „Organizacija i ljudski resursi“ prema kriteriju povećanja kvalitete	206
Tablica 29 Skupina elemenata „Pametno projektiranje tehnoloških procesa“ prema kriteriju spremnosti financijskog ulaganja	207
Tablica 30 Skupina elemenata „Infrastruktura“ prema kriteriju spremnosti financijskog ulaganja	208
Tablica 31 Skupina elemenata „Organizacija i ljudski resursi“ prema kriteriju spremnosti financijskog ulaganja.....	209

Tablica 32 Skupina elemenata „Pametno projektiranje tehnoloških procesa“ prema kriteriju složenosti izvedbe i primjene	210
Tablica 33 Skupina elemenata „Infrastruktura“ prema kriteriju složenosti izvedbe i primjene	211
Tablica 34 Skupina elemenata „Organizacija i ljudski resursi“ prema kriteriju složenosti izvedbe i primjene	212
Tablica 35 Skupina elemenata „Pametno projektiranje tehnoloških procesa“ prema kriteriju očekivano vrijeme povrata investicije	213
Tablica 36 Skupina elemenata „Infrastruktura“ prema kriteriju očekivano vrijeme povrata investicije.....	214
Tablica 37 Skupina elemenata „Organizacija i ljudski resursi“ prema kriteriju očekivano vrijeme povrata investicije	215

POPIS PRILOGA

Prilog 1. Anketa „Digitalizacija odjela tehnološke pripreme“

Prilog 2. Mann Whitney U-test uzoraka prema skupinama

Prilog 3. Anketa „Digitalizacija projektiranja tehnoloških procesa“

Prilog 4. Obrada podataka i ponderiranje

Prilog 5. Analiza osjetljivosti modela

Prilog 6. Anketa „Spremnost tehnološke pripreme za Industriju 4.0“

1. UVOD

Industrija 4.0 koncept je upravljanja, organizacije i funkcioniranja tvrtke koji je rezultat digitalizacije. Svojevrsni je sinonim za četvrtu industrijsku (r)evoluciju stoga zahtjeva velike promijene unutar postojećeg poslovnog okruženja, što također zahtjeva i određene financijske investicije. Naziv je to koji predstavlja potpunu digitalizaciju [1], a kao takav je prihvaćen prvenstveno u Njemačkoj [2], te je prihvaćen i u ostatku Europe. Kina također ima svoju inačicu Industrije 4.0, odnosno digitalne tvrtke, a to je strateški plan „Made in China 2025“ [3] dok se u SAD-u ovaj pojam uvriježio kao „Industrial Internet of Things“ [4].

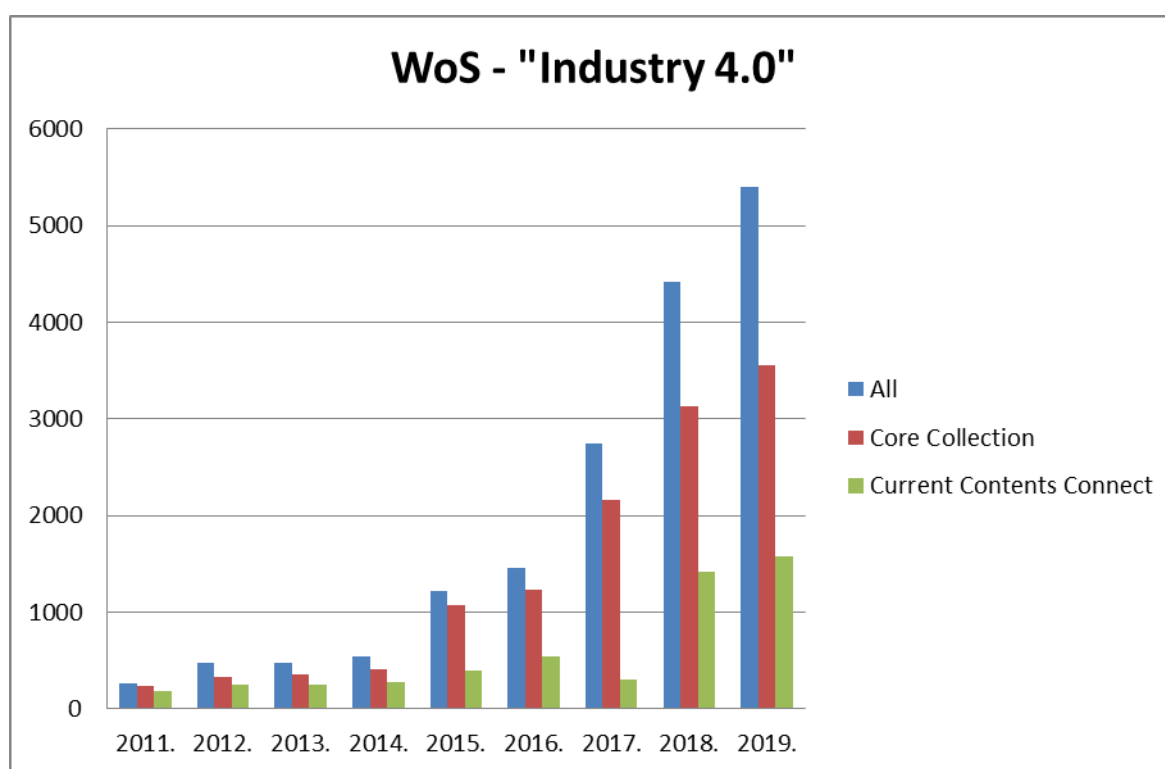
Široj je javnosti poznat od 2011., kada je predstavljen na Tehnološkom sajmu u Hannoveru [5], a skoro deset godina nakon, ovaj koncept više nije stvar trenda ili inovativnog unapređenja tvrtke, već je zbog svojih karakteristika sukladnim potražnji tržišta postao imperativ. U jednakoj mjeri ga trebaju prihvatiti velike, male i srednje tvrtke kako bi u bližoj i daljnjoj mogućnosti mogla opstati na tržištu [2].

Svaki segment tvrtke je potrebno digitalizirati, pa tako i odjel tehnološke pripreme, odnosno odjel projektiranja tehnoloških procesa, korak između konstrukcije i fizičke proizvodnje, u kojem se definira plan izrade proizvoda – potrebne tehnologije, redoslijed operacija, strojevi, alati, režimi rada te potrebno vrijeme izrade proizvoda.

Prije uvođenja novog, digitalnog koncepta radnog okruženja, potrebno je izračunati čimbenik spremnosti, budući da digitalizacija iziskuje ponekad i radikalne promjene i visoke investicije. Čimbenik spremnosti pokazuje gdje se određena tvrtka trenutno nalazi, uspoređujući s ciljanim stanjem, odnosno idealnom verzijom istog prema karakteristikama Industrije 4.0. Kako svaki dio lanca vrijednosti ne zahtjeva jednake promjene, u ovom će se radu naglasak staviti na odjel projektiranja tehnoloških procesa.

2. PREGLED LITERATURE

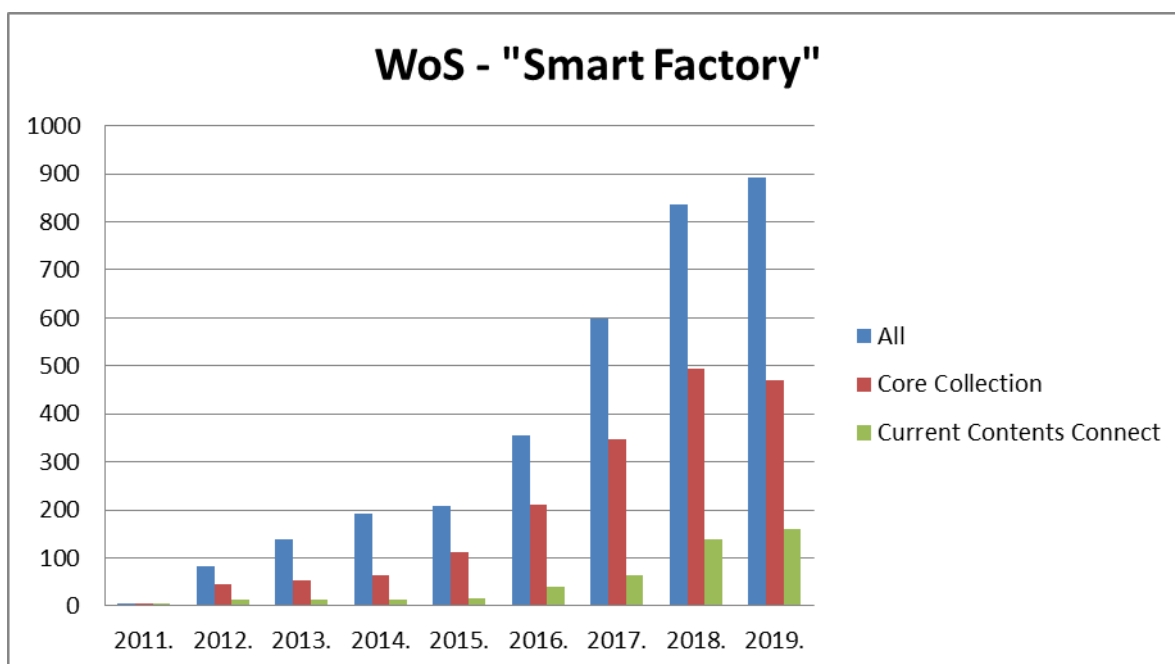
Budući da je Industrija 4.0 kao pojam predstavljena 2011., istraživanje literature izvršeno je u periodu od 2011. do 2019. godine. Pregledani su radovi iz dvije najveće i najrelevantnije baze, *Web of Science* i *Scopus*. Pretraživanje je izvršeno prema pojmu „Industrija 4.0“ (eng. *Industry 4.0*) te njemu srodnim pojmovima “pametna tvornica” (eng. *Smart Factory*), “internet stvari” (eng. *Internet of Things*) te “kibernetско-fizički sustavi” (eng. *Cyber Physical System*) uz povezivanje istih s područjem „projektiranje tehnoloških procesa“ (eng. *Process Planning*) i „čimbenik spremnosti“ (eng. *Readiness Factor*). Svako je područje bilo pretraživano zasebno, te finalno, kako bi se uvidjela korelacija u područjima i prepoznala mogućnost znanstvenog doprinosa u smislu novog pristupa, pretraženi su radovi koji su kombinacija danih pojmova.



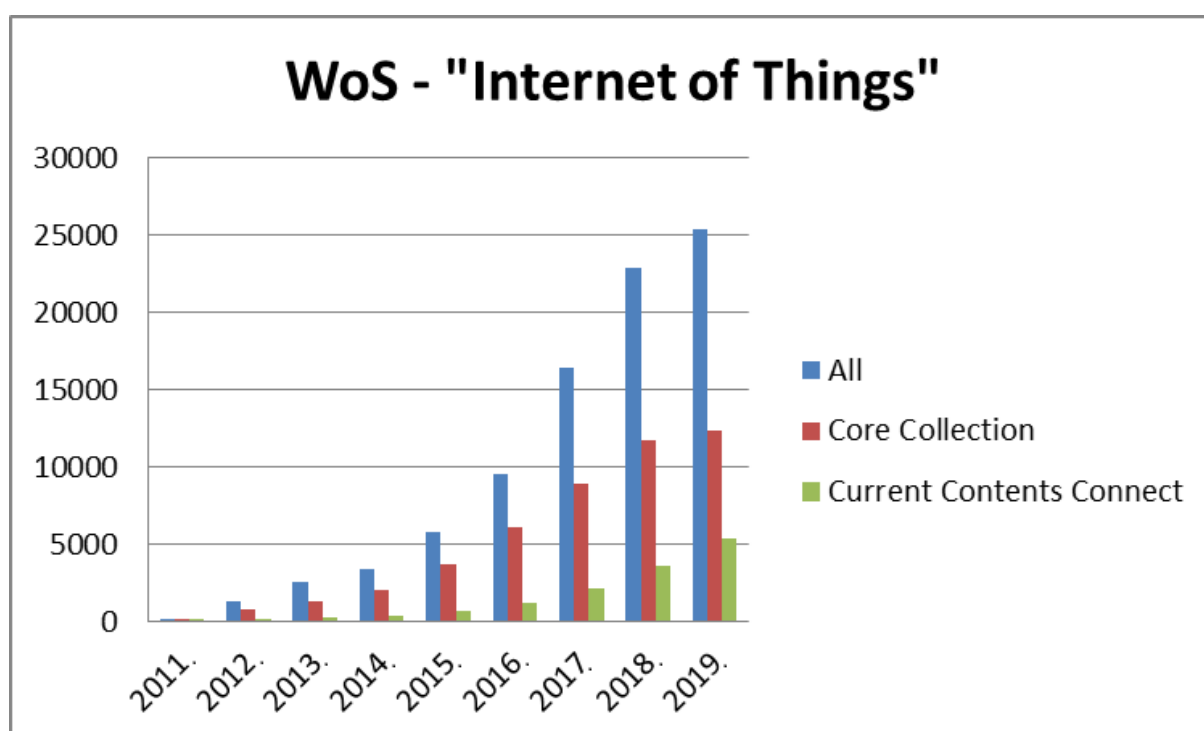
Slika 1. Objavljeni radovi u bazi Web of Science na temu „Industry 4.0“ (2011.-2019.)

Prema statističkim podacima o broju objavljenih radova u bazi *Web of Science* (WoS), zajedno s potkategorijama iste (*Core Collection* i *Current Contents*), primijećen je značajan

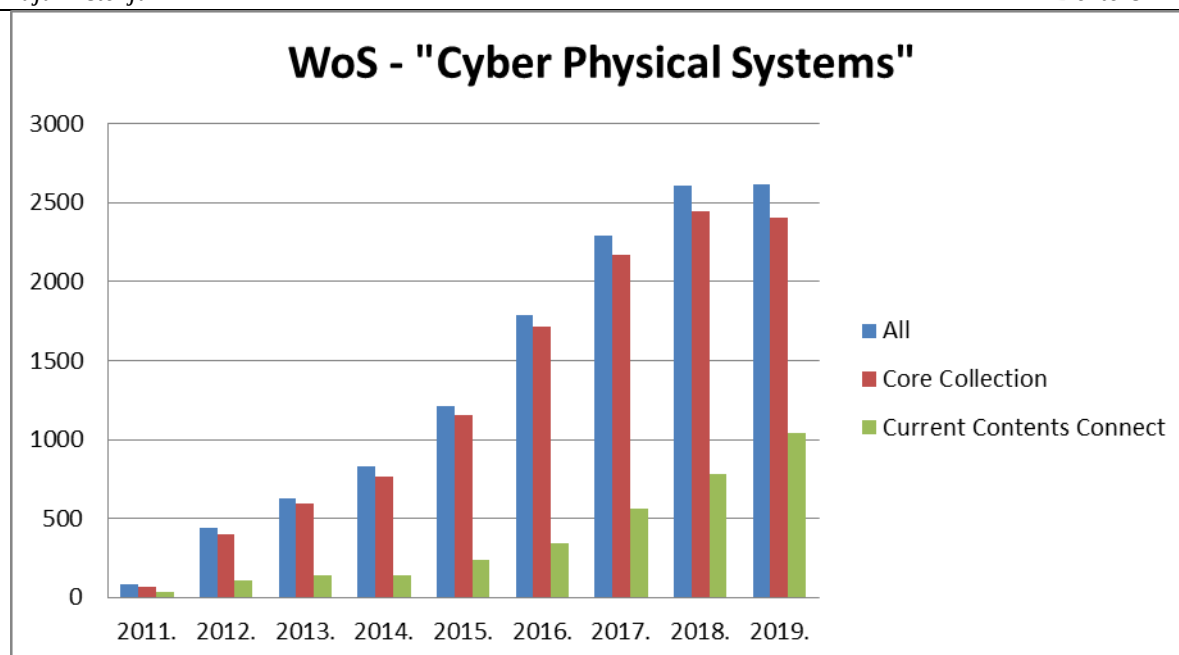
porast broja objavljenih radova iz područja Industrije 4.0, s najvećim brojem objava u 2019. godini.



Slika 2. Objavljeni radovi u bazi Web of Science na temu „Smart Factory“ (2011.-2019.)

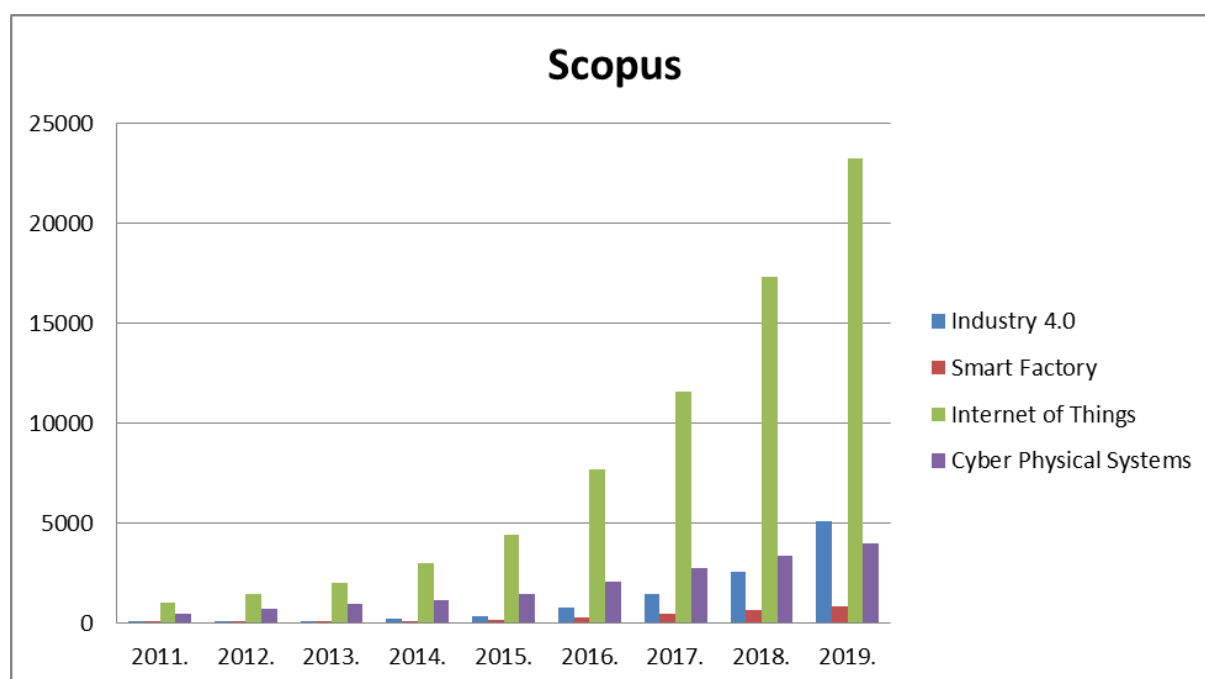


Slika 3. Objavljeni radovi u bazi Web of Science na temu „Internet of Things“ (2011.-2019.)



Slika 4. Objavljeni radovi u bazi Web of Science na temu „Cyber Physical Systems“ (2011.-2019.)

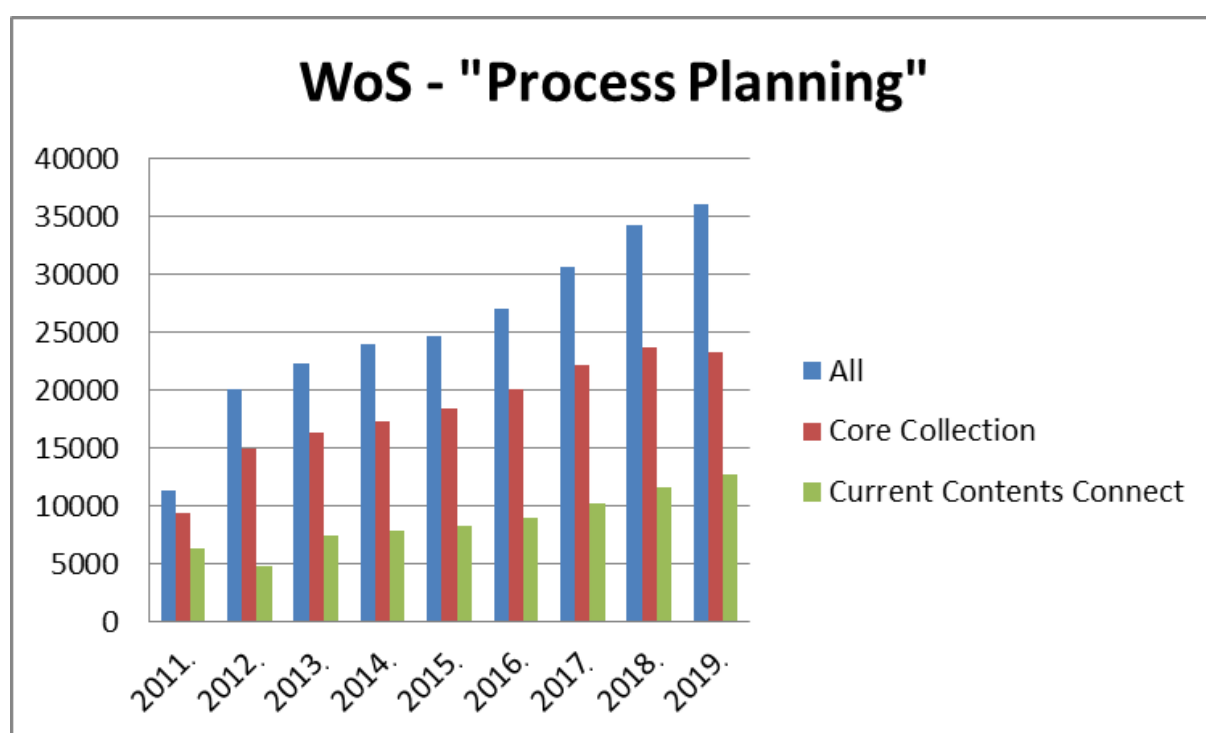
Povezani pojmovi „Smart Factory“, „Internet of Things“ i „Cyber Physical Systems“ također bilježe porast, s najvećim brojem objavljenih radova u 2019. godini. Kod svakog je povezanog pojma primijećen i kontinuirani rast objava unutar Current Contents Connect baze, s najrelevantnijim radovima iz područja, što je od posebne važnosti.



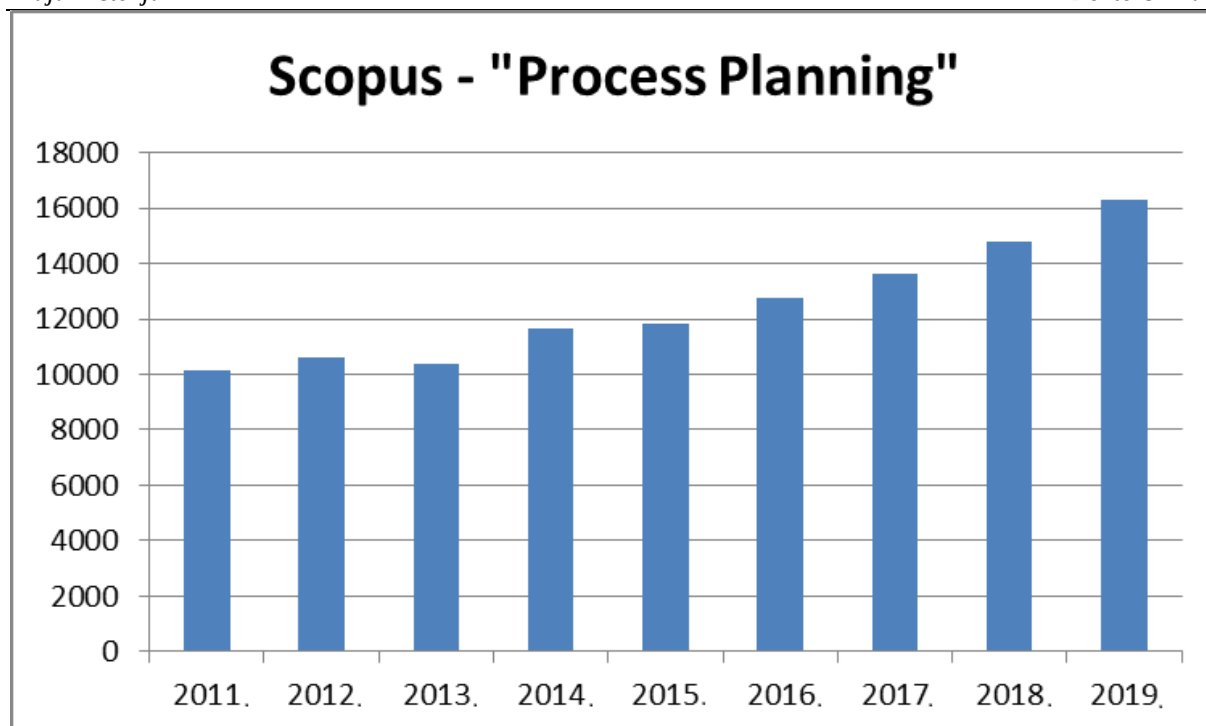
Slika 5. Objavljeni radovi u bazi Scopus na temu „Industry 4.0“, „Smart Factory“, „Internet of Things“ i „Cyber Physical Systems“ (2011.-2019.)

U bazi Scopus nije primijećen pad popularnosti pojma "Industry 4.0". Prisutan je rast tijekom godina dok je najveći broj radova objavljen 2019. Srodni pojmovi također bilježe porast, no vidljivo po količini dominiraju radovi objavljeni pod temom „Internet of Things“. Radi se o globalnom pojmu za općenitu digitalizaciju u svim segmentima ljudskog života i djelovanja, stoga je broj ovih radova puno veći od ostalih srodnih pojmova, tj. područje primjene je šire.

Projektiranje tehnoloških procesa (eng. *Process Planning*) već je nekoliko desetljeća prisutno kao dio znanstveno-istraživačkih radova, a kao takvo je područje i primijenjeno u praksi. Stoga u ovom području nije primijećen značajni i nagli porast broja objavljenih radova, no blagi porast popularnosti je zamijećen tijekom godina, s najvećim brojem objavljenih radova također u 2019.

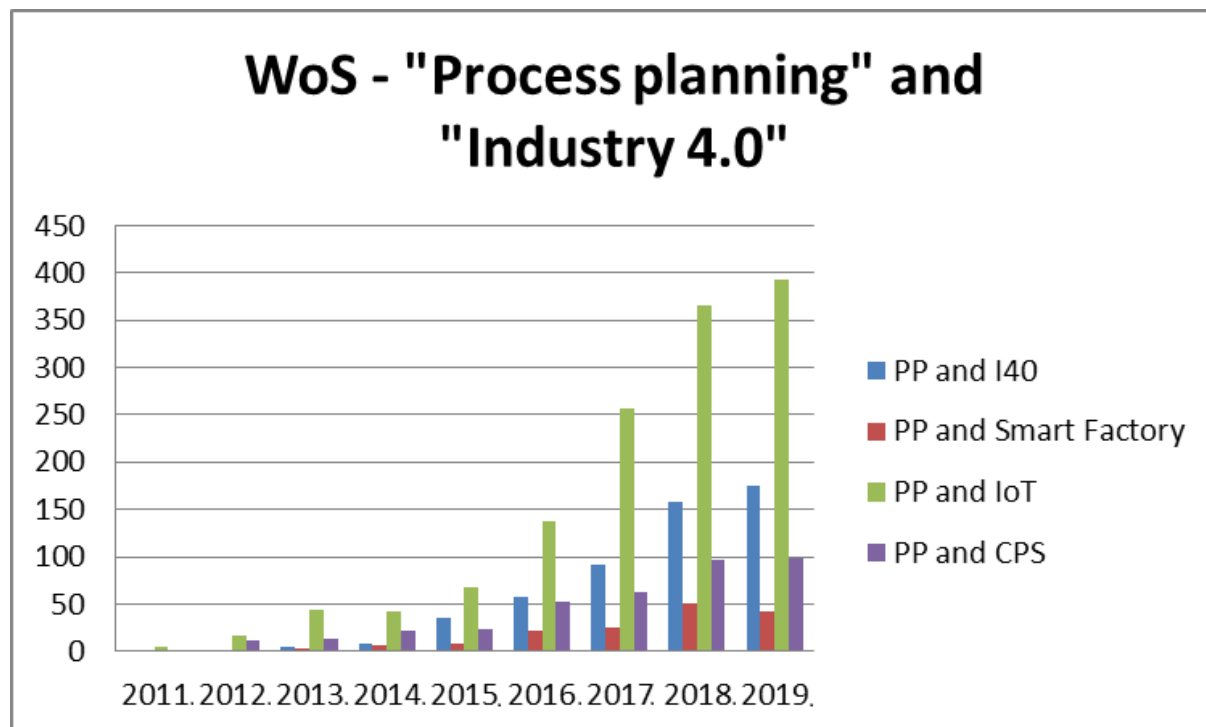


Slika 6. Objavljeni radovi u bazi Web of Science na temu „Proces Planning“ (2011.-2019.)



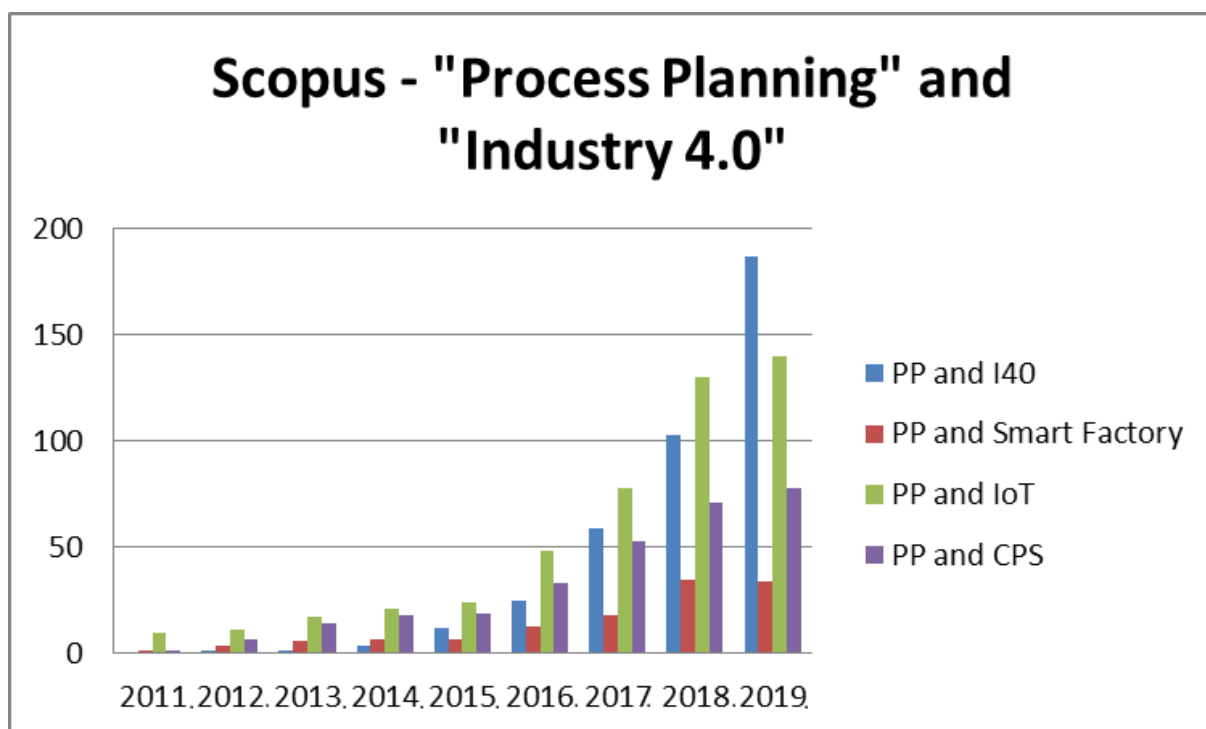
Slika 7. Objavljeni radovi u bazi Scopus na temu „Proces Planning“ (2011.-2019.)

Istraživanje je zatim provedeno u kombinaciji pojmova “Industry 4.0” i “Process Planning”. Rezultati su dani u nastavku.



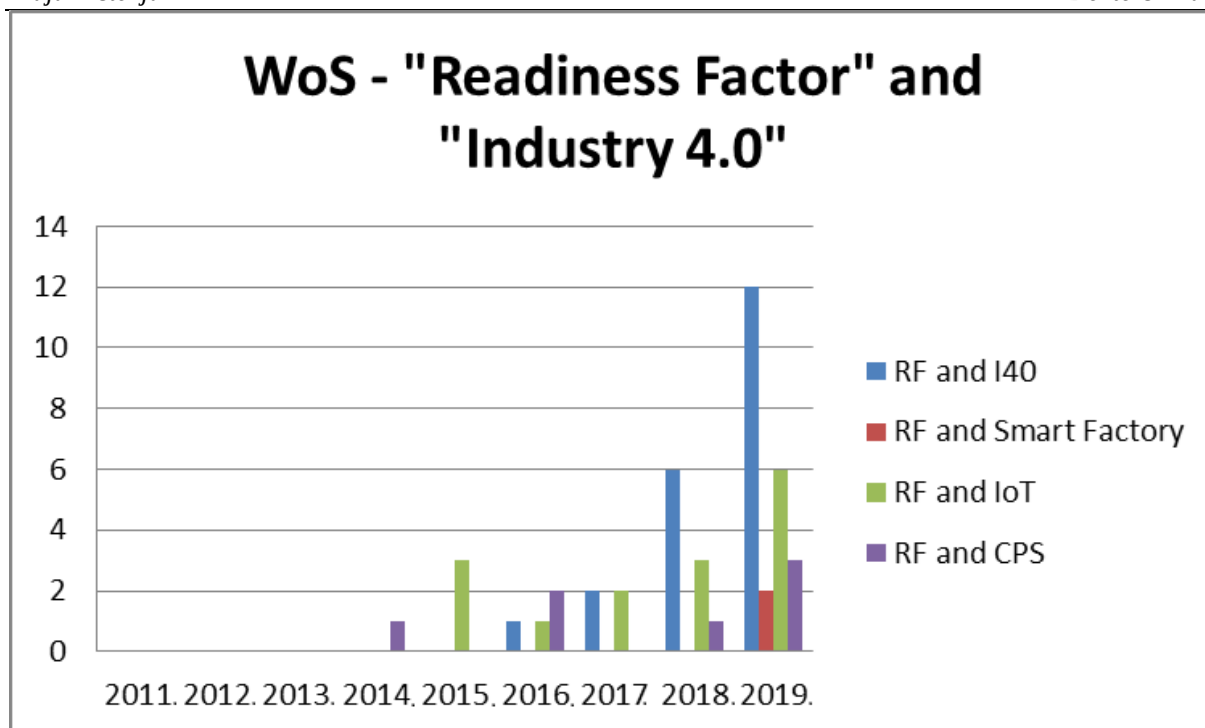
Slika 8. Objavljeni radovi u bazi Web of Science povezani uz „Industry 4.0“ i „Proces Planning“ (2011.-2019.)

Jednak je trend primijećen i u ovom slučaju, no od svih radova na temu Industrije 4.0 samo je oko 1-5% onih povezanih s projektiranjem tehnoloških procesa, položaj ovog odjela, njegov oblik te implementaciju u novo, digitalno industrijsko okruženje.



Slika 9. Objavljeni radovi u bazi Scopus povezani uz „Industry 4.0“ i „Proces Planning“ (2011.-2019.)

U bazi Scopus nalazi se nešto više objavljenih radova iz kombinacije područja, a daljnje je istraživanje izvršeno u povezanosti pojmova “Industrija 4.0” (eng. „Industry 4.0“) i “Čimbenik spremnosti” (eng. „Readiness Factor“, odnosno računanje čimbenika spremnosti za Industriju 4.0, čiji su rezultati prikazani u nastavku.



Slika 10. Objavljeni radovi u bazi Web of Science povezani uz „Industry 4.0“ i „Readiness Factor“ (2011.-2019.)

Istraživanja povezana s proračunom čimbenika spremnosti za Industriju 4.0 objavljena su u još manjem obujmu od projektiranja tehnoloških procesa, a čine oko 1% od ukupnog broja radova na području Industrije 4.0, što ukazuje na određene nedostatke u području i mogućnosti unapređenja.

Ovi rezultati pokazuju da je Industrija 4.0 tema koja je u proteklih nekoliko godina u značajnom trendu te je kao takva jedna od najvažnijih trenutnih tema u području industrijskog inženjerstva, kao imperativ svim tvrtkama da što prije započnu s implementacijom.

U prvoj fazi, prije implementacije, na temelju teoretskih postavki dostupnih u literaturi, čimbenik spremnosti za industriju 4.0 bi se svakako trebao izračunati. Do sada je isti bio fokusiran isključivo na čitav organizacijski sustav. Projektiranje tehnoloških procesa u okviru Industrije 4.0 u znanstvenim je istraživanjima prisutno u tragovima, stoga je već sada zamijećen određen nedostatak. Slijedi detaljan pregled istraživanja na polju izračuna čimbenika spremnosti za Industriju 4.0.

2.1. Detaljan pregled sadržaja objavljenih stručnih i znanstvenih radova

Prema iznesenim statističkim podacima iz znanstvenih baza (*Web of Science* i *Scopus*) i prethodnog istraživanja, teoretska postava Industrije 4.0 i njenih karakteristika pobudila je jako veliki interes te je tako istovremeno osigurala dovoljno detaljan uvid u koncept. Okvir praktične primjene predložen je za nekoliko vrsta industrije unutar kojih postoje određena

saznanja o načinu funkcioniranja hardvera, softvera i organizacije. Usprkos dobroj teorijskoj pozadini, do sada je objavljeno poprilično malo studija slučaja (eng. *case studies*) o primjeni i kompletnoj implementaciji koncepta, od kojih je većina fokusirana samo na segmente istog ili na stvaranje “tvornica za učenje” (eng. *Learning factory*) [6].

Istraživanja vezana za izračun spremnosti za Industriju 4.0 moguće je podijeliti u dvije grupe – komercijalnu i znanstvenu. Svaka skupina koristi određen, za istu specifičan, pristup u kalkulaciji čimbenika spremnosti i načina primjene u praksi koji će biti opisan u nastavku.

U tablici 1 prikazano je grupiranje trenutnih radova u komercijalni i znanstveni pristup. Razlika između komercijalnog i znanstvenog pristupa sastoji se od nekoliko segmenata. *Komercijalni pristup* se većinom bazira svojevrsnim *online*-anketama za samoprocjenu, napravljenima ciljano od strane, većinom, konzultantskih korporacija, a pronađeni su općenitim pretraživanjem dostupnih izvora na internetu. Radi se o poprilično općenitom pristupu ponekad upitne kvalitete, jer cilj konzultantskih kuća je profit koji, finalno, može utjecati i na nedovoljnu dobro razrađenu strategiju implementacije i transformacije, dok je, s druge strane, u znanstvenom pristupu važan svaki segment industrije i relevantnost metode koja je provjerena od strane drugih stručnjaka iz područja, korišteni su kompleksniji matematički pristupi pri izračunu čimbenika spremnosti.

Detaljnijim uvidom u komercijalni pristup prepoznate su dvije vrste radova (modela) – online alati za samoprocjenu i ankete uz primjenu strukturiranih intervjua. Unutar znanstvenog pristupa, radovi su također podijeljeni u dvije grupe. Prvu čine oni koji sagledavaju čitavu tvrtku ili industriju kao jedan sustav, bilo kao pojedinačni ili geografski lociran (države, regije, kontinenti), a drugu čine oni koji razmatraju spremnost određenih dijelova (odjela) tvrtke.

Tablica 1 Pregled metoda za izračun spremnosti tvrtke za Industriju 4.0

Izračun spremnosti za Industriju 4.0	Komercijalni pristup	Samoprojecna	Impuls-stiftung, 2018 [7]
			EDB Singapore, 2018 [8]
			KPMG Atlas, 2018 [9]
			pwc, 2016 [10]
		Anketa i strukturiran intervju	Readiness Assessment (Warwick) [11]
			I-Scoop, 2018. [12]
			Industry 4wrd, Malaysia [13]
			World Economic Forum [14]
			McKinsey and Co. [15]
			Boston Consulting Group [16]

			Circumference Technology Services [17]
			Roland Berger Strategy Consultants [18]
			Capgemini Maturity Model [19]
			UK Readiness Report [20]
	Znanstveni pristup	<i>Općeniti pristup (organizacija kao sustav, industrija, država ili regija)</i>	Model zrelosti (Austrija, Schumacher i ostali) [21]
			Infosys (Češka, Basl i ostali) [22]
			Indeks pametne suradnje (Mađarska, Nick i Pongracz) [23]
			Model zrelosti u tri stadija (Ganzarin i Errasti) [24]
			Digital Maturity Model (Gill i VanBoskirk) [25]
			Zrelost tvrtke (Koska i ostali) [26]
			AHP i Topsis rangiranje (Babić i ostali) [27]
			Online upitnik za SMEs (Trotta i Garengo) [28]
			Spremnost ekonomskog razvoja (Rusija, Popkova i ostali) [29]
			Malezijski upitnik spremnosti (Hamidi i ostali) [30]
			Spremnost industrije namještaja (Malezija) [31]
			Spremnost za pametnu proizvodnju - SMEs (Češka, Modark i ostali) [32]
			Spremnost lanca nabave (Rusija, Krykavskyy i ostali) [33]
			Upitnik samoprocjene (Brozzi i ostali) [34]
			Razvoj i Industrija 4.0 (EU, Castelo-Branco i ostali) [35]
		<i>Detaljniji pristup (za određeno područje/odjel)</i>	SIMMI 4.0 (Leyh i ostali) [36]
			ERP sustavi (Egipat, Haddara i Elragar) [37]
			Aratech – Model u šest faza (Schuh i ostali) [38]
			Integracija modela zrelosti procjene sposobnosti (De Carolis i ostali) [39]
			ManuTech model zrelosti (Blockchain, Gracel i Lebkowski) [40]
			Model zrelosti za prihvaćanje Blockchain tehnologije (Wang i ostali) [41]
			Model zrelosti za automobilsku industriju (Sjodin i ostali) [42]
			NRW za Logistiku 4.0 (Gajšek i ostali) [43]
			Spremnost dostave u lancu nabave (Asdecker i Felch) [44]
			Čimbenik spremnosti za pametne usluge (Kaltenbach i ostali) [45]
			Čimbenik spremnosti za proizvodnju (Canetta i ostali) [46]
			Model zrelosti za upravljanje životnim vijekom proizvoda (PLM) (dos Santos i ostali) [47]

2.1.1. Komercijalni prisutp

Čimbenik spremnosti, kao pregled trenutnog stanja unutar tvrtke treba služiti kao nagovještaj i poticaj za promjene te definiciju strateškog plana za digitalnu transformaciju uz što manje troškove, kraće vrijeme implementacije i veće koristi u budućnosti. Do sada, većina komercijalnih pristupa dala je grube rezultate, strukturirane sukladno poprilično općenitom i grubo postavljenom modelu, temeljenom na anketama, koje većinom provode utjecajne konzultantske tvrtke.

IMPULS [7] iz Njemačke predstavlja online sustav za samoprocjenu spremnosti za Industriju 4.0. Ova *online* forma dostupna je svakom zainteresiranom subjektu, odnosno javno je dostupna širokoj populaciji. Cilj je provjeriti koliko je subjekt spreman za Industriju 4.0 te uočiti njegove mogućnosti za unapređenje. Tvrde da je njihov “Model spremnosti” (eng. *The Readiness Model*) baza za samoprocjenu i usporedbu s drugim predstavnicima industrije. Tvrtke procjenjuje u pet (šest) razina spremnosti: autsajder, početnik, napredni, iskusni, ekspert i najbolji u skupini (eng. *Outsider, Beginner, Intermediate, Experienced, Expert, Top Performers*). Prve dvije grupe zajednički su označeni pojmom debitanti (eng. *Newcomers*), treću čine učenici (eng. *Learners*) dok su posljednje tri vođe (eng. *Leaders*). Procjena se vrši samostalno u područjima (dimenzijama): zaposlenici (eng. *Employees*), strategija i organizacija (eng. *Strategy and Organization*), pametna tvornica (eng. *Smart Factory*), pametni proizvodni procesi (eng. *Smart Operations*), pametni proizvodi (eng. *Smart Products*) i podatkovno-orijentirane usluge (eng. *Data-driven services*) s vlastitim potkategorijama. Unutar svake kategorije (dimenzije) formirano je nekoliko pitanja preko jednostavnih *online* obrazaca iz kojih se automatski generira statistička obrada rezultata te se finalno vrši usporedba s ostalim tvrtkama iz istog industrijskog područja.

Sveučilište u Warwicku u suradnji s tvrtkama *Crimson&Co* i *Pinsent Masons* razvilo je alat za procjenu spremnosti s “ciljem formiranja jednostavnog i intuitivnog načina za tvrtke da procjene svoju spremnost i odrede buduće ambicije s potencijalom kibernetičko-fizičkog doba” [11]. Tvrde da je potrebno ispitati šest glavnih dimenzija s 37 subdimenzija a to su: *proizvodi i usluge, proizvodnja i operacije, strategija i organizacija, lanac nabave, poslovni model i legalni čimbenici*. Tvrtka se prema rezultatu svrstava u četiri kategorije – *početnik, napredni, iskusni i ekspert*. Ispitivanje je provedeno u 22 zemlje, među ukupno 53 sudionika od kojih su 74% ispitanika činili članovi višeg menadžmenta i uprave. Rezultati su identificirali trenutno stanje u tvrtki te njihovu razinu spremnosti. U svakoj podkategoriji uz trenutno stanje navedena je i ambicija tvrtke za budućnost.

Njemačka akademija znanosti i inženjerstva, u suradnji s tvrtkom Infosys, *Institutom za industrijsko inženjerstvo* (FIR) i Sveučilištem RWTH u Aachenu, provela je globalno istraživanje, kreirali model zrelosti za Industriju 4.0 kako bi se otkrila razina spremnosti unutar različitih vrsta industrija. Istraživanje „Industrija 4.0: stanje nacije“ (eng. *Industry 4.0: The state of the nation*) pomogla je u izgradnji „indeksa zrelosti za Industriju 4.0 (eng. *Industry 4.0 Maturity Index*) koji je usredotočen na detaljan pregled spremnosti. Anketa je provedena u 400 proizvodnih tvrtki iz pet država te pokazuje svjesnost o postojanju koncepta uz generalni pregled do sada realiziranih implementacija [12].

2018. na *Svjetskom ekonomskom forumu* predstavljen je izvještaj „Spremnost za budućnost proizvodnje“ (eng. *Readiness for the Future of Production Report*). Postavljena je inicijativa za održivu budućnost proizvodnje koja je usmjerena k rješenjima, s ljudskim znanjem u središtu pozornosti, održiva i inkluzivna. Predstavljen je okvir mogućnosti usporedbe s konkurencijom, dijagnostički alat te set podataka za pojedine države kako bi bolje mogli razumjeti vlastitu „budućnost proizvodnje“. Prve analize provedene su u Indiji, Japanu, Meksiku, Rusiji i Južnoafričkoj Republici. Kasnije je još više država uključeno u istraživanje. „Dijagnostički model spremnosti“ (eng. *Readiness Diagnostic Model Framework*) sastoji se od dva dijela – *Struktura proizvodnje* i *Raznolikost proizvodnje*. Prva je podijeljena u dimenzije *kompleksnost* i *veličina* dok je drugu čine u *tehnologija* i *inovacije*, *ljudski kapital*, *globalna trgovina* i *investicije*, *institucijski okvir*, *održivi resursi* i *vanjski zahtjevi*. Države su prema rezultatima podijeljene u kategorije: *visoki potencijal*, *vodeće*, *početnici* i *tradicionalisti*. Za budućnost proizvodnje prepoznali su dvanaest ključnih tehnologija, među kojima su aditivna proizvodnja, korištenje naprednih materijala i nanomaterijala, *blockchain*, virtualna stvarnost i ostale. Evaluirali su spremnost na skali od 1 do 10 s vlastitom shemom prioriteta. Do sada, to je geografski najdetaljnije provedeno istraživanje [14].

Economic Development Board tvrdi da je razvio “prvi alat za katalizaciju i transformaciju industrijskog sektora pri transformaciji u Industriju 4.0” [8]. Radi se o *online* dijagnostičkom alatu koji pomaže u razumijevanju koncepta Industrije 4.0 kako bi donio održivu vrijednost pojedinim poslovnim subjektima. Glavne dimenzije koje se procjenjuju su: *proizvodni procesi*, *tehnologije* i *organizacija*, zajedno sa svojim subdimenzijama. Za svaku subdimenziju formira se matrica procjene kako bi se evaluirali svi trenutni procesi unutar organizacije.

U Maleziji, Vlada [13] je predstavila projekt “Industry4wrd procjena spremnosti“ (eng. *Industry4wrd Readiness Assessment*) koji “određuje spremnost za prihvaćanje tehnologija

Industrije 4.0” kako bi se “identificirali nedostaci i mogućnosti unapređenja pri uvođenju Industrije 4.0 kao i uvidjele prilike za unapređenje produktivnosti i gospodarski rast”. Ovaj plan podrazumijeva razvoj strategija i planova kako bi se zadani projekti mogli ostvariti. Čimbenici (dimenzije) koji zahtijevaju promjenu su *ljudi, procesi (proizvodni i poslovni) i tehnologije s pokretačima financiranje, infrastruktura, pravila, vještine i talenti te tehnologija*. Tvrtke koje će proći procjenu bit će svrstane u jednu od pet kategorija: *konvencionalisti, debitanti, učenici, iskusni i vođe*.

Manji i personaliziraniji projekti predstavljeni su od strane nekoliko konzultantskih tvrtki kao usluge *audita*, odnosno procjene trenutnog stanja. Slična istraživanja na individualnoj, regionalnoj ili državnoj razini proveli su *McKinsey and Co.* [15]; *Boston Consulting Group* [16]; *KPMG Atlas* [9]; *Circumfence Technology Services* [17], *pwc* [10] i ostali [18], [19], [20].

2.1.2. Znanstveni pristup

Pored standardnih anketa, tijekom godina je primijećen porast primjena raznih znanstvenih pristupa pri računanju čimbenika spremnosti, koji koriste kompleksnije matematičke modele.

Jedan od znanstveno najpopularnijih pristupa je „Model zrelosti“ (eng. *Maturity model*) Schumahera i ostalih [21], koji se bazira na devet kategorija (dimenzija) unutar tvrtke. To su *strategija, vodstvo, klijenti, proizvodi, operacije, kultura, ljudi, organizacija i tehnologija*. Podaci se prikupljaju putem posebnog upitnika u kojem korisnik treba na skali od 1 do 5 odrediti trenutne karakteristike unutar svake tvrtke te definirati jesu li one u potpunosti implementirane (5) ili nisu uopće (1). Kasnije se podaci obrađuju s posebnim matematičkom metodom proračuna zrelosti rezultat čega je čimbenik spremnosti, broj koji se također može analizirati i za svaku od pojedinih navedenih kategorija.

U Češkoj, Basl i ostali razvili su model čiji je glavni fokus na svjesnosti o konceptu Industrije 4.0 koji je interpretiran kao spremnost [22]. Pitanja u upitniku bazirana su na *Infosys* istraživanju spomenutom u prethodnom poglavlju te se radi o bazičnom teoretskom pristupu gdje je želja dobiti spoznaju o tome koliko su lokalne tvrtke svjesna postojanja koncepta Industrije 4.0.

SIMMI 4.0 – *System Integration Maturity Model Industry 4.0* Leyh i ostali [36] ima za cilj odrediti trenutnu spremnost tvrtke kako bi se klasificirala IT infrastruktura potrebna za digitalizaciju. Sastoji se od pet faza, a svaka opisuje jednu karakteristiku digitalizacije koja čak omogućuje i samoprocjenu svakog pojedinog korisnika. Čimbenik spremnosti ovdje nosi

naziv „digitalizacijske faze“ gdje za svaku postoje preporučene aktivnosti za buduće korake kako bi se digitalizacija provela do kraja.

Spremnost ERP sustava za “tvornicu budućnosti” predmet je istraživanja iz Egipta Haddare i Elragala [37]. Podaci su prikupljeni pomoću nekoliko intervju u kojima se ispitalo poznavanje ERP sustava i njihova povezanost s Industrijom 4.0. S obzirom na odgovore pojedinaca iz tvrtke, prepoznati su određeni izazovi pri digitalizaciji.

U Mađarskoj, Nick i Pongracz računali su spremnost gradova za digitalizaciju. Kao istraživački okvir korišten je *dijamantni model Michaela Poertera* kako bi se stvorio model kompetitivnosti te je finalno generiran “Smart Collaboration Index” kao rezultat [23].

„Model zrelosti u tri faze“ Ganzaraina i Errastija [24] pilot je pristup koji definira akcijski model digitalizacije te prepoznaje prilike unutar tvrtke za usvajanje novog koncepta. Tvrtka se analizira u tri faze, kako bi se kreirala individualna vizija za Industrijom 4.0. Prikupljaju se informacije o *energiji, elektronici, digitalnom poslovanju i naprednoj mehanici metala*. U prvoj fazi “vizija” provodi se analiza resursa i kapaciteta zajedno s generalnim razumijevanjem Industrije 4.0. U drugoj fazi “roadmap” identificiraju se zahtjevi za tehnologiju dok se u finalnoj fazi “projekti” definira edukativni kapacitet zajedno s menadžmentom rizika budućih projekata digitalizacije. Na kraju tvrtke se prema spremnosti karakteriziraju u pet razina – *Initial, Managed, Defined, Transform i Detailed BM* kao skala zrelosti.

Acatech studija – Nacionalne akademije znanosti i inženjerstva [38] u Njemačkoj, predstavila je indeks zrelosti gdje je transformacija okarakterizirana u šest dimenzija – *kompjuterizacija, povezanost, vidljivost, transparentnost, prediktivnost kapaciteta i prilagodljivost*. Oni prethode nekoliko funkcionalnih područja – *razvoju, proizvodnji, logistici, uslugama, marketingu i prodaji*. Definirano je šest razina zrelosti koja su provjerena unutar *informacijskih sustava, resursa, organizacijske strukture i kulture* kao strukturnih područja.

Pristup baziran na CMMI (*Capability Maturity Model Integration*) De Carolisa i ostalih, koristi različite dimenzije kako bi procijenio stanje projektiranja i inženjerstva, proizvodnje, kvalitete, održavanja i logistike. Finalni rezultat opisuje trenutnu praksu u svakom od navedenih područja [39].

Sličan model razvio je Forrester (uz *dimenzije kultura, tehnologija, organizacija, unutarnji procesi*) [47], također postoje modeli čiji se rezultati baziraju na industrijskoj revoluciji u kojoj se tvrtka trenutno nalazi, kao onaj Gilla i VanBoskirka [25]; *Manutech Maturity Model* [40], model zrelosti za prihvaćanje *blockchain* tehnologije Gracela i Lebkowskog [40], model

Sjödina i ostalih testiran u automobilske industrije s ciljem kultiviranja digitalne kulture kroz agilne procese i modularne tehnologije [42]. Osim tradicionalnih modela za izračun razine zrelosti unutar četiri industrijske revolucije, onaj Trotte i Garenga je posebno definirana za male i srednje tvrtke [28] s naglaskom na organizacijski pristup. U Rusiji, Popkova i ostali ispituju organizacijsku razinu ekonomskog razvitka uz posebno strukturiranje i raslojavanje organizacije koje omogućuje formiranje strateškog plana za implementaciju Industrije 4.0 [29].

Razvijen je i model procjene razine zrelosti za Logistiku 4.0. Radi se o modelu temeljenom na modelu zrelosti NRW-a Gajšek i ostalih [43] koji pokriva dimenzije *poslovnih modela, IT sustava, upravljanja kvalitetom, upravljanja proizvodnim i tehnološkim procesima, planiranja proizvodnje, kontrole proizvodnje, logistike i interakcije čovjek-stroj*, a sve to specijalizirano za digitalne logističke sustave dok je sličan model Asdeckera i Felcha također razvijen i za lanac opskrbe [44]. Spremnost lanca opskrbe testirana je na primjeru ukrajinskih tvrtka (Krykavskyy i ostali) [33] gdje su glavni pokretači lanca nabave najprije identificirani te zatim, bazirano na rezultatima, osobnih anketa za samoprocjenu, definirana je zrelost za ukupno 102 tvrtke. Također, Kaltenbach i ostali, definirali su okvir proračuna čimbenika spremnosti za pametne usluge [45].

Za male i srednje tvrtke dizajniran je online alat Cannette i ostalih za samoprocjenu koji omogućuje mjerenje spremnosti općenitih karakteristika tvrtke koji dalje omogućuje analizu tranzicijskog razdoblja. Sličan model zrelosti proveden je u Maleziji za cjelokupno gospodarstvo [46] dok je poseban upitnik Ratnasingama i ostalih, s ključnim pokretačima digitalizacije, poslan pripadnicima industrije namještaja, posebno onima za koje se smatralo da nisu spremni za prihvaćanje Industrije 4.0 [31]. Samoprocjena za pametnu proizvodnju i pametnu logistiku za male i srednje tvrtke, u Češkoj su predstavili Modrak i ostali [32].

Osim logistike, lanca nabave i *blockchaina*, okvir za proračun čimbenika spremnosti razvijen je za proizvodne procese [41] i bazira se na *dimenzijama strategija, procesi, tehnologija, proizvodi, usluge i ljudi*.

Jedan od najkompleksnijih i najnaprednijih predstavljenih znanstvenih pristupa, što se specifičnih područja tiče, je *Product Lifecycle Management Maturity Model* dos Santosa i ostalih [47] koji koristi kombinaciju ProKnow-C i AHP metode kako bi provjerio stupanj razvoja s korištenjem PLM-a kao relevantnog sustava.

Studija Castela-Branca i ostalih je provedena na području Europske Unije [35], a bazirana je na digitalnoj strategiji tržišta, čiji je cilj bio prikazati postojanje digitalne infrastrukture te

moгуćnost obrade velike količine podataka. Razlikuje prisilnu implementaciju Industrije 4.0 s prirodnim procesom razvoja te uvođenja novih tehnologija.

Druga studija Leyh i ostalih provedena na području EU prepoznala je slojeve tvrtke te kreirala metamodel za kalkulaciju čimbenika spremnosti [36].

Kompletna pregled trenutno dostupnih metoda proračuna čimbenika spremnosti u literaturi prikazan je u tablici 2 s istaknutim područjem djelovanja te najbitnijim karakteristikama.

Tablica 2 Karakteristike objavljenih radova na temu čimbenika spremnosti za Industriju 4.0 (2011.-2019.)

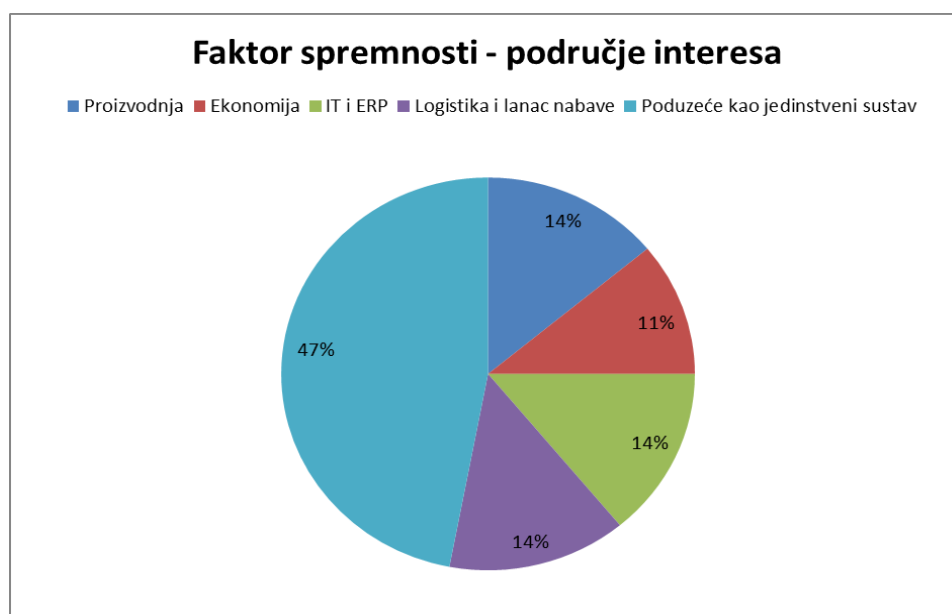
Metoda	Područje djelovanja	Karakteristike
Impuls-stiftung, 2018 [7]	Općenito	Online samoprocjena, pregled dvadeset kriterija iz šest grupa, nije personalizirano
EDB Singapore, 2018 [8]	Općenito	Kriteriji su strukturirani u tri grupe, s grubom evaluacijom karakteristika Industrije 4.0 u cjelokupnom sustavu tvrtke, s dobro strukturiranom matricom prioriteta uz utjecaj troškova/prihoda i razmatranje KPI-eva
KPMG Atlas, 2018 [9]	Općenito	Rezultati daju pregled trenutnog stanja u jednoj od šest dimenzija, a to su <i>strategija, ljudi, financije, sustav i mreže</i> – bez detaljnog tranzicijskog akcijskog plana
pwc, 2016 [10]	Općenito	Online samoprocjena, prema karakteristikama četiri industrijskih revolucija, prednost je mogućnost usporedbe s konkurencijom
Readiness Assessment (Warwick) [11]	Općenito, uključene 22 države	Prihvatanje tehnologije s četiri definirane razine kriterija – <i>prilagodbe proizvoda, digitalnih karakteristika proizvoda, podatkovno-orijentiranih usluga, korištenje podataka proizvoda i razdioba prihoda</i> . Nisu definirani detaljni koraci transformacije.
I-Scoop, 2018 [12]	Općenito	Razmatra općeniti interes tvrtke za Industriju 4.0 te vlastita subjektivna vizija njihovog djelovanja u budućnosti
Industry 4.0, Malaysia [13]	Općenito, Malezija	Odluka između tri strategije koje omogućuju postizanje cilja, nisu personalizirane niti su definirani točni koraci
World Economic Forum [14]	Općenito, svjetska razina	Definirani su ključni pokretači proizvodnje, s detaljnim opisom određenih tehnologija – detaljnije od prosjeka, ali nije personaliziran pristup
McKinsey and Co, 2018 [15]	Općenito, proizvodne tvrtke	Osam dimenzija, dvadeset i šest kriterija, nema razlike između vrsta industrija
Boston Consulting Group, 2017 [16]	Općenito	Devet dimenzija, grubo skeniranje i pregled stanja s fokusom na korištenje digitalnih tehnologija
Circumference Technology Services, 2018 [17]	Općenito	Komercijalni pristup s fokusom na implementaciju mobilnih aplikacija

Metoda	Područje djelovanja	Karakteristike
Roland Berger Strategy Consultants [18]	Općenito, Europa	Skala od pet točaka koja se bazira na financijskim utjecajnim čimbenicima
Capgemini model zrelosti [19]	Općenito	Fokus na određenoj grani industrije i njihovom korištenju digitalnih tehnologija
UK izvještaj spremnosti [20]	Općenito, UK	Istražuje razumijevanje Industrije 4.0 i subjektivne procjene pojedinaca
Model zrelosti (Austrija, Schumacher i ostali) [21]	Općenito	Jedan od najpopularnijih znanstvenih pristupa, matematička kalkulacija s 4+5 dimenzija (kriterija) bez fokusa na određen tip industrije ili definiciju budućeg plana
Infosys (Češka, Basl i ostali) [22]	Općenito, Češka	Upitnik koji istražuje poznavanje koncepta
Indeks pametne suradnje (Mađarska, Nick i Pongracz) [23]	Općenito, Mađarska	Pametni gradovi, razvijen <i>Smart Collaboration Index</i>
Model zrelosti u tri stadija (Ganzarin i Errasti) [24]	Općenito, Austrija	Razvoj strategije u tri koraka kako provesti digitalizaciju
Digital Maturity Model (Gill i VanBoskirk) [25]	Općenito	Četiri dimenzije i tri ključne funkcionalne aktivnosti – <i>strategija, upravljanje i poslovna izvrsnost</i> – s fokusom na ljudski čimbenik u transformacijskom razdoblju
Zrelost tvrtke (Koska i ostali) [26]	Općenito, proizvodnja	Fokus na tehnologiju i proizvodnju, rezultati bazirani na osam pitanja o trenutnom korištenju istih i određenim karakteristikama
AHP i Topsis rangiranje (Babić i ostali) [27]	Općenito, Hrvatska	Korištenje metoda za potporu odlučivanju kako bi se rangirali kriteriji s AHP metodom te izračunu finalnog čimbenika spremnosti s TOPSIS metodom
Online upitnik za SMEs (Trotta i Garengo) [28]	Općenito, male i srednje tvrtke	Definicija spremnosti u šest dimenzija - strategija, tehnologija, proizvodnja, proizvodi i ljudi – pristup baziran na upitniku
Spremnost ekonomskog razvoja (Rusija, Popkova i ostali) [29]	Općenito, ekonomija i financije	Fokus na mogućnosti kontrole i upravljanja pitanjima ekonomije i menadžmenta – barijere i rizici
Malezijski upitnik spremnosti (Hamidi i ostali) [30]	Općenito, Malezija	Korištenje IMPULS modela u šest dimenzija
Spremnost industrije namještaja (Malezija) [31]	Općenito, industrija namještaja, Malezija	Stupanj automatizacije, pokretačke sile
Spremnost za pametnu proizvodnju - SMEs (Češka, Modark i ostali) [32]	Općenito, Češka, SMEs	Definicija transformacijske strategije
Spremnost lanca nabave (Rusija, Lanac nabave,	Lanac nabave,	Pokretači promjena u ukrajinskim tvrtkama

Metoda	Područje djelovanja	Karakteristike
Krykavskyy i ostali) [33]	Ukrajina	
Upitnik samoprocjene (Brozzi i ostali) [34]	Općenito	Samoprocjena putem upitnika
Razvoj i Industrija 4.0 (EU, Castelo-Branco i ostali) [35]	Općenito, proizvodna industrija, EU	Identifikacija postojeće digitalne infrastrukture koja može koristiti pri obradi velike količine podataka
SIMMI 4.0 (Leyh i ostali) [36]	IT i softver	Mogućnost samoprocjene, objašnjene faze digitalizacije
ERP sustavi (Egipat, Haddara i Elragar) [37]	ERP	Istraživanje bazirano na intervjuu o trenutnom stanju ERP sustava te osobnim potrebama pojedinih sudionika
Aratech – Model u šest faza (Schuh i ostali) [38]	Općenito	Definirano šest faza razvoja
Integracija modela zrelosti procjene sposobnosti (De Carolis i ostali) [39]	Proizvodnja	CMMI okvir u pet proizvodnih područja – <i>konstrukcija i projektiranje, proizvodni menadžment, upravljanje kvalitetom, održavanje i logistika</i>
ManuTech model zrelosti (Blockchain, Gracel i Lebkowski) [40]	Proizvodna industrija, Poljska	Osam dimenzija proizvodnog procesa
Model zrelosti za prihvaćanje Blockchain tehnologije (Wang i ostali) [41]	Blockchain	Razvoj modela za uvođenje <i>blockchain</i> tehnologije
Model zrelosti za automobilsku industriju (Sjodin i ostali) [42]	Automobilska industrija	Izazovi definirani na temelju pet automobilskih tvrtka – četiri faze razvoja
NRW za Logistiku 4.0 (Gajšek i ostali) [43]	Logistika	Grubi okvir za model zrelosti Logistike 4.0
Spremnost procesa dostave u lancu nabave (Asdecker i Felch) [44]	Lanac nabave - proces dostave	Dostavna logistika – definicija izvrsnosti i postizanje izvrsnosti
Čimbenik spremnosti za pametne usluge (Kaltenbach i ostali) [45]	Pametne usluge, Njemačka	Kategorije – upravljanje tehnologijama, financijskim resursima i korporativnom kulturom
Čimbenik spremnosti za proizvodnju (Canetta i ostali) [46]	Proizvodnja	Definicija transformacije u pet dimenzija – strategija, aktivnosti, tehnologije, proizvodi i usluge te ljudi.
Model zrelosti za upravljanje životnim vijekom proizvoda (PLM) (dos Santos i ostali) [47]	PLM	Korištenje ProKnow-C i AHP metode za model zrelosti.

2.2. Nedostaci trenutnih saznanja

Većina modela za procjenu zrelosti, odnosno izračun čimbenika spremnosti predstavljeni su 2017. i 2018. Većina je s ciljem spoznaje trenutne situacije u industriji na državnoj ili regionalnoj razini, kao što je prikazano na slici 11. Komercijalni pristup omogućuje samoprocjenu jedne tvrtke, gledajući istu kao jedinstveni sustav, stoga se zaključuje da je ovaj pristup poprilično grub i općenit. Bazira se na upitnicima čiji se rezultati evaluiraju pomoću jednostavnih statističkih metoda srednjih vrijednosti dok se čimbenik kao takav prilagođava razini postignute industrijske revolucije. Detaljni pregled svakog pojedinog odjela ili segmenta tvrtke još uvijek nije predstavljen.



Slika 11 Udio pojedinih područja interesa u objavljenim radovima povezanim s izračunom čimbenika spremnosti za Industriju 4.0

S druge strane, znanstveni je pristup nešto kompleksniji, modeli koji se koriste podržani su kompleksnijim statističkim i matematičkim metodama te su razvijeni posebni slučajevi za pojedine segmente tvrtke. Na slici 11 je vidljivo kako se među do sada objavljenim radovima iz ovog područja većina fokusira na tvrtku kao jedinstveni sustav dok postoje specijalizirani pristupi za logistiku, IT i ERP sustave, proizvodnju te financijske i ekonomske aspekte tvrtke. Projektiranje tehnoloških procesa kao područje još uvijek nije razmatrano iz ovog kuta gledišta, stoga je ista činjenica prepoznata kao mogućnost znanstvenog doprinosa te će se u nastavku kreirati poseban model za izračun čimbenika spremnosti usmjeren na projektiranje tehnoloških procesa.

Za ovo područje nije razvijen poseban sustav dimenzija (stablo kriterija), kao što nije ni sagledan segment mogućnosti uvođenja po različitim kriterijima kao što su složenost izvedbe

i primjene, spremnost financijskog ulaganja, vrijeme povrata investicije i sl. Ovaj segment je važan kako bi se na temelju čimbenika spremnosti mogao u daljnjim koracima kreirati optimalni plan transformacije, budući da tvrtke često već u početku odustaju od digitalizacije zbog potrebnih visokih financijskih ulaganja i potpune reorganizacije radnog prostora, bez jasnog orijentira o budućim benefitima. Važnost individualnog pristupa i pristupa svakom odjelu kao jedinstvenom sustavu leži u činjenici da je, grubo gledajući, princip funkcioniranja sustava isti, no transformacijski zahtjevi, količina i kompleksnost potrebnih promjena mijenja se u ovisnosti o segmentu, odnosno odjelu tvrtke.

Kako bi se kreirao model izračuna čimbenika spremnosti u nastavku će se najprije provesti preliminarno istraživanje o trenutnom stanju u hrvatskim tvrtkama, zatim će se kreirati idealni oblik kao ciljano i referentno stanje odjela projektiranja tehnoloških procesa prema konceptu Industrije 4.0. Na temelju prethodno provedenog pregleda literature i rezultata preliminarog istraživanja formirat će se stablo kriterija (dimenzija) na temelju kojih će biti proveden izračun čimbenika spremnosti prema posebnom modelu koji će također biti opisan u nastavku, a temeljen je na sustavima za podršku pri odlučivanju.

3. PLAN ISTRAŽIVANJA I METODA RADA

Istraživanje će biti provedeno u nekoliko faza. Na početku istražiti će znanstveni i stručni radovi objavljeni u dostupnoj literaturi. Tako će se dobiti uvid u dosadašnja postignuća na području koncepta Industrije 4.0, izračuna čimbenika spremnosti, projektiranja tehnoloških procesa, korištenja višekriterijskih metoda za podršku pri odlučivanju te međusobnu povezanost istih pojmova.

Na temelju uočenih nedostataka trenutnih saznanja formirat će se model izračuna čimbenika spremnosti za Industriju 4.0 usmjerenoga na projektiranje tehnoloških procesa, uz korištenje višekriterijskih metoda za podršku pri odlučivanju. Zatim će se, na temelju teoretskih saznanja iz literature, definirati teorijski okvir projektiranja tehnoloških procesa u Industriji 4.0 što će dalje služiti kao referentno (ciljano, idealno) stanje svake tvrtke pri implementaciji novog koncepta.

Provest će se preliminarno istraživanje u kojem će se dobiti uvid trenutna saznanja i svjesnost o Industriji 4.0 među sudionicima iz privrede, ciljanom skupinom koja se bavi projektiranjem tehnoloških procesa.

Na temelju svega do sada navedenog, formirat će se model izračuna unutar kojeg će biti definirani kriteriji ocjenjivanja trenutnog stanja (elementi Industrije 4.0), metoda višekriterijskog optimiranja koja će se koristiti te metoda kvantifikacije kvalitativnih kriterija. Model će se na kraju verificirati simulacijom, a primjenjivost istog u praksi će se ispitati u okviru studije slučaja (eng. case study), na realnom primjeru iz privrede.

3.1. Ciljevi i hipoteza istraživanja

Istraživanjem će se tako ispuniti sljedeći ciljevi:

1. Razviti model za izračun čimbenika spremnosti uvođenja koncepta Industrije 4.0 usmjerenog na projektiranje tehnoloških procesa temeljen na modelima višekriterijalnog odlučivanja i optimiranja.
2. Definirati kriterije potrebne za izračun čimbenika spremnosti tvrtke za koncept Industrije 4.0. koji se odnose na projektiranje tehnoloških procesa.
3. Definirati metodu kvantifikacije kvalitativnih kriterija s ciljem minimiziranja subjektivnosti pri evaluaciji;

čime će se potvrditi postavljena hipoteza:

„Moguće je razviti model za izračun čimbenika spremnosti tvrtke za primjenu koncepta Industrije 4.0 temeljen na metodama višekriterijalnog odlučivanja i optimiranja, usmjeren na projektiranje tehnoloških procesa.“

3.2. Očekivani znanstveni doprinos

Očekivani znanstveni doprinosi ovog Dokorskog rada su:

1. Definicija kriterija za izračun čimbenika spremnosti tvrtke za koncept Industrije 4.0 usmjerenih na projektiranje tehnoloških procesa.
2. Model izračuna čimbenika spremnosti tvrtke za implementaciju koncepta Industrije 4.0 usmjerenoga na projektiranje tehnoloških procesa.
3. Novi postupak kvantifikacije utjecajnih kriterija s ciljem minimiziranja subjektivnosti.

4. INDUSTRIJA 4.0 I PROJEKTIRANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA

Industrija 4.0 novi je koncept poslovanja koji je posljedica, odnosno rezultat digitalizacije tvrtke. Ideje o u potpunosti digitaliziranoj tvrtki nastale su već ranije, pojavom CIM-a i fleksibilnih obradnih sustava, no razvojem hardvera, softvera, padom njihove cijene na tržištu i povećanjem dostupnosti, razvojem naprednih matematičkih prediktivnih metoda i organizacijskog znanja sada je u potpunosti moguće i nužno realizirati ovaj koncept.

Temeljne značajke Industrije 4.0 su sljedeće [48]:

- *Interoperabilnost.* Strojeva, uređaja, senzora i ljudi koji su u stalnoj međusobnoj komunikaciji.
- *Transparentnost informacija.* Virtualna kopija fizičkog svijeta potrebna je za kontekstualizaciju informacija.
- *Tehnička podrška.* Strojevi su podrška ljudima u donošenju odluka i rješavanju problema i daju mogućnost pomoći u rješavanju prezahtjevnih ili nesigurnih radnji.
- *Decentralizirano odlučivanje.* Mogućnost samostalnog donošenja odluke sustava, što je autonomnije moguće.

Automatizacija svih poslovnih i proizvodnih procesa te nadzor nad podacima u realnom vremenu postali su nužnost, a kao još veća nužnost postavila se velika fleksibilnost proizvodnog procesa, odnosno prilagodbe proizvoda svakom kupcu.

Kupac kao središte pozornosti zahtjeva specijalizirani proizvod prema vlastitim potrebama na što proizvođač treba odgovoriti u što kraćem roku, što kvalitetnije i uz što niže troškove kako bi sebi osigurali veći profit. Specijalizirana proizvodnja ne odnosi se samo na kupce pojedince koji samostalno daju zahtjeve već i na određene grupacije, odnosno ciljanu publiku čije je potrebe potrebno stalno pratiti kako bi se proizvod formirao u dobrom smjeru, prije konkurencije [49].

Različiti sektori tvrtke i dosad su bili povezani, no iz navedenih razloga zahtjevi za povezanošću i komunikacijom su na dosad najvišoj razini. Napredak tehnike i internetska infrastruktura to i omogućuje, a ljudsko znanje potrebno je iskoristiti za gradnju posebnih informacijskih sustava koji omogućuju brzu i laku komunikaciju između odjela. Povezano s konceptom interneta stvari u kojem, osim ljudske komunikacije i komunikacije čovjeka i stroja dodana je komunikacija između strojeva, kao sastavni dio industrije 4.0.

Budući da najnoviji koncept zahtjeva potpunu automatizaciju kao i umrežavanje svakog segmenta poslovanja, korištenje naprednih tehnologija i prediktivnih analiza, od slabije razvijenih tvrtki to zahtjeva određene investicije. Otpor promjenama svakodnevna je prepreka ka uvođenju novina u tvrtku, a postaje još veća kada se radi o drastičnim promjenama kao što je uvođenje ovog zahtjevnog koncepta [50]. Prije izrade investicijskog plana, potrebno je odrediti je li tvrtka spremna za ovakav pothvat te na kojoj je razini razvijenosti. To se provodi izračunom čimbenika spremnosti kojeg je potrebno definirati i formirati cjelokupni sustav koji će precizno i vjerodostojno dati dobre rezultate.

4.1. Povijesni razvoj koncepta Industrije 4.0

Ideja je nastala već sedamdesetih godina 20. stoljeća kada je prvi put predstavljen model „tvornice bez ljudi“. Ubrzo je predstavljen koncept CIM (eng. *Computer-Integrated Manufacturing*) – koncept proizvodnje u kojima se računalima kontroliraju svi procesi u radnom okruženju [51]. Desetak godina kasnije koncept je teorijski razrađen i komercijalno promoviran. Radi se o tome da individualne operacije međusobno izmjenjuju informacije kako bi implicirali akcije, čime se dobiva povećanje produktivnosti, smanjen je udio pogrešaka dok je cjelokupni proces proizvodnje automatiziran. Tipičan se CIM bazira na zatvorenim petljama baziranim na ulaznim podacima koje u stvarnom vremenu primaju iz senzora. Time se također postiže mogućnost proizvodnje s velikim stupnjem fleksibilnosti.

Postoji nekoliko definicija CIM-a, a jedna od najranijih je ona Kochana i Cowana iz 1986.: *CIM je koncept potpuno automatizirane tvornice u kojoj su svi proizvodni procesi integrirani i kontrolirani od strane CAD/CAM sustava. CIM omogućuje upraviteljima proizvodnje, radnicima i računovođama da koriste istu bazu podataka kao dizajneri proizvoda i inženjeri.* [52].

1991. definiciju je dala *Digital Equipments Corporation* u kojoj je naglasak stavljen na važnost informacija: *CIM je primjena informacijskih tehnologija u proizvodnji kako bi se osiguralo da prava informacija bude na pravom mjestu u pravo vrijeme što omogućuje postizanje proizvodnih, procesnih i poslovnih ciljeva* [53].

Computer and Automation Systems Automation of the Society of Manufacturing Engineers je 1996. dala sljedeću definiciju: *CIM je integracija kompletne proizvodne organizacije integriranim sustavima i informacijskim kanalima s novim upravljačkim filozofijama koje omogućuju unapređenje organizacijske i osobne produktivnosti* [54].

Novim konceptom nije bio cilj zamijeniti ljudski rad strojevima ili kompjuterima, već stvoriti automatizirano okruženje u proizvodnji i organizaciji. Literatura nalaže da nije u potpunosti potrebno automatizirati tvornicu kako bi se implementirao CIM, pogotovo se ne savjetuje da se ulažu velike financijske investicije ako potreba za fleksibilnom proizvodnjom nije usko grlo čitave tvrtke [55]. Danas je situacija drugačija, s obzirom na to da tržište zahtijeva personalizirane proizvode visoke kvalitete u što kraćem roku uz što povoljniju cijenu, stoga promijene koje su se prije nalagale kao opcionalne sada esencijalne – sustav je potrebno ne samo automatizirati, već i digitalizirati. [56].

CIM je korišten u automobilske, zrakoplovne industriji te brodogradnji, te kao takav povezuje individualne odjele tvrtke čime je omogućena potpuna i direktna kontrola svih procesa i operacija unutar organizacije, bilo da se radi o onima iz odjela marketinga ili logistike te proizvodnje.

Korisnost CIM-a posebno je istaknuta u području dizajna, analize, planiranja, prodaje, računovodstva te upravljanja zalihama.

Karakteristike koje razlikuju CIM od ostalih metoda jesu sljedeće:

- mogućnost pohranjivanja podataka, njihovo pronalaženje, manipulacija te eksploatacija,
- postojanje mehanizama za otkrivanje trenutno stanje svih proizvodnih i poslovnih procesa i mogućnosti njihovih promjena,
- postojanje algoritama za objedinjenje i povezivanje komponenata za obradu podataka s komponentama za njihovo prikupljanje sa senzora [57].

4.1.1. Podsustavi CIM-a

CIM objedinjuje mnogo razvijenih tehnologija, softvera i hardvera čija je međusobna interakcija esencijalna za implementaciju ovog koncepta unutar tvrtke. Radi se o podsustavima navedenima u nastavku, koji su svojevrsne sastavne komponente CIM-a [58]

Računalom podržani podsustavi:

- *CAD (computer-aided design),*
- *CAE (computer-aided engineering),*
- *CAM (computer-aided manufacturing),*
- *CAPP (computer-aided process planning),*

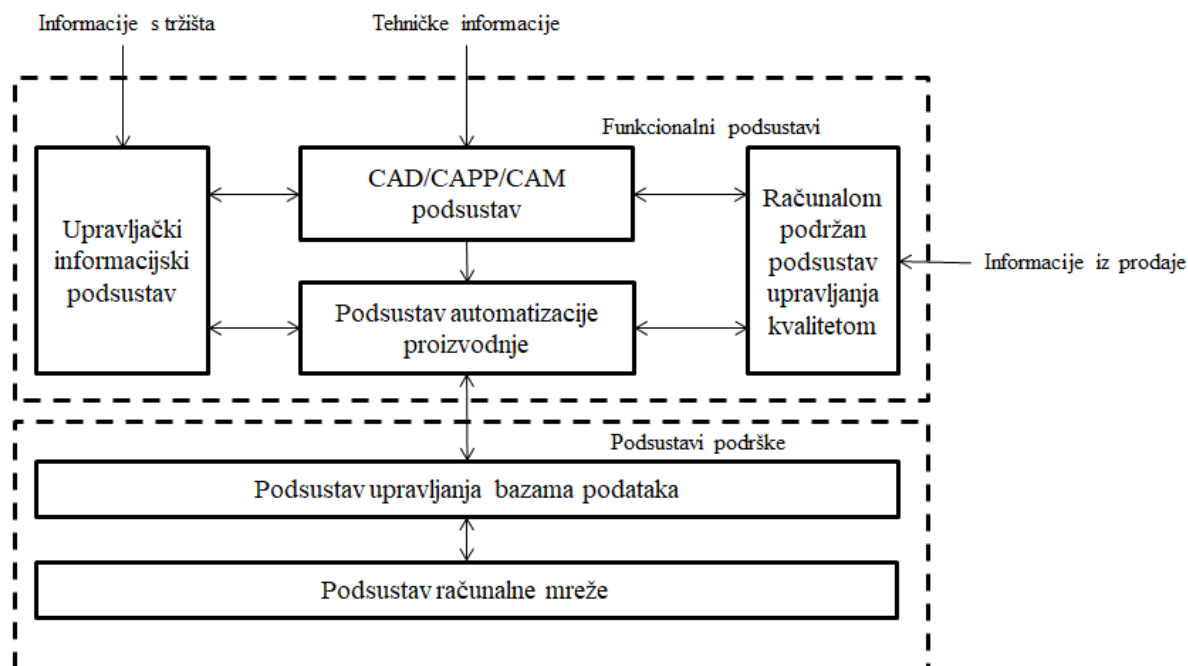
- CAQ (*computer-aided quality assurance*),
- PPC (*production planning and control*),
- ERP (*enterprise resource planning*).

Potrebni strojevi i uređaji za fizičku realizaciju:

- računalom podržani strojevi za obradu, CNC (eng. *Computer numerical controlled machine tools*),
- programabilni logički kontroleri, PLC (eng. *Programmable logic controllers*),
- elementi robotike:
 - računala,
 - softver,
 - kontroleri,
 - mreže,
 - oprema za nadzor.
- tehnologije,
- fleksibilni proizvodni sustav,
- automatizirani sustavi za skladištenje i komisioniranje,
- robotika,
- automatizirani transportni sustavi.

4.1.2. Struktura CIM-a

I hardver i softver zajedničke su komponente CIM sustava koje trebaju cijelo vrijeme međusobno dobro funkcionirati. Pod hardverom se podrazumijevaju kompjutorske komponente, žice, strojevi za proizvodnju i periferne komponente. Softver uključuje operacijske sustave, komunikacijski softver, softver za upravljanje bazama podataka, softver za planiranje i upravljanje proizvodnjom, softver za odlučivanje itd. Svaka komponenta radi zajednički s ostalima kako bi se stvorio stabilan, ali istovremeno kompleksan sustav s nekoliko podsustava (slika 12) koje svaka tvrtka može odrediti prema vlastitim potrebama.



Slika 12 Struktura CIM-a [59]

Na slici 12 vidljivo je kako se CIM sastoji od mnogo manjih sustava koji su međusobno povezani te primaju informacije iz okoline. Informacije povezane s tržištem primaju se u informacijski sustav za upravljanje, dok se tehničke informacije primaju u CAD/CAPP/CAM sustav. Informacije o prodaji primaju se u računalom potpomognut sustav za upravljanje kontrolom. Oni su međusobno povezani i sa sustavom za automatizaciju proizvodnje, a potpomognuti sustavom za upravljanje bazama podataka te mrežnih veza kako bi sve moglo ispravno funkcionirati [59].

4.1.3. Informacijski sustav za upravljanje

Informacijski sustav igra vrlo važnu ulogu unutar tvrtke. Upravlja poslovnim procesima i informacijama povezanim s tržišnom strategijom, predviđanjem prodaje, poslovnog odlučivanja, procesuiranjem narudžbi, nabave materijala, upravljanja financijama, upravljanja zalihama, upravljanja ljudskim resursima, planom proizvodnje itd. Njegovom upotrebom cilj je smanjiti vrijeme dostave, odnosno izrade proizvoda, smanjiti troškove i pomoći tvrtki da brzo i ispravno odgovori na promijene na tržištu.

ERP (eng. *Enterprise Resource Planning*) se trenutno i najčešće koristi u ovoj funkciji, s mnogo komercijalnih inačica kao SAP ili BaanERP. ERP sustav osigurava fleksibilnost u poslovanju, odnosu s kupcima te integraciju s dobavljačima i isporučiteljima [60]

4.1.4. CAD/CAPP/CAM

CAD sustav (eng. Computer Aided Design) je računalni alat za projektiranje inženjerskih proizvoda. Originalno su se CAD sustavi bavili samo geometrijskim modeliranjem, dok danas sve više CAD sustava uključuje i ostale aspekte projektiranja. Prvotno stvoreni za izradu 2D tehničkih crteža, sustavi su tijekom godina unaprijeđeni, te danas korisnici imaju mogućnost manipulacije kompleksnim 3D modelima. Koriste se kod kreiranja, modifikacije, analize i optimizacije dizajna proizvoda. Podrška su procesu konstruiranja u kreiranju geometrijske prezentacije proizvoda, dimenzioniranju i tolerancijama, upravljanju izmjenama, arhiviranju i razmjeni informacija o dijelovima i sklopovima [61].

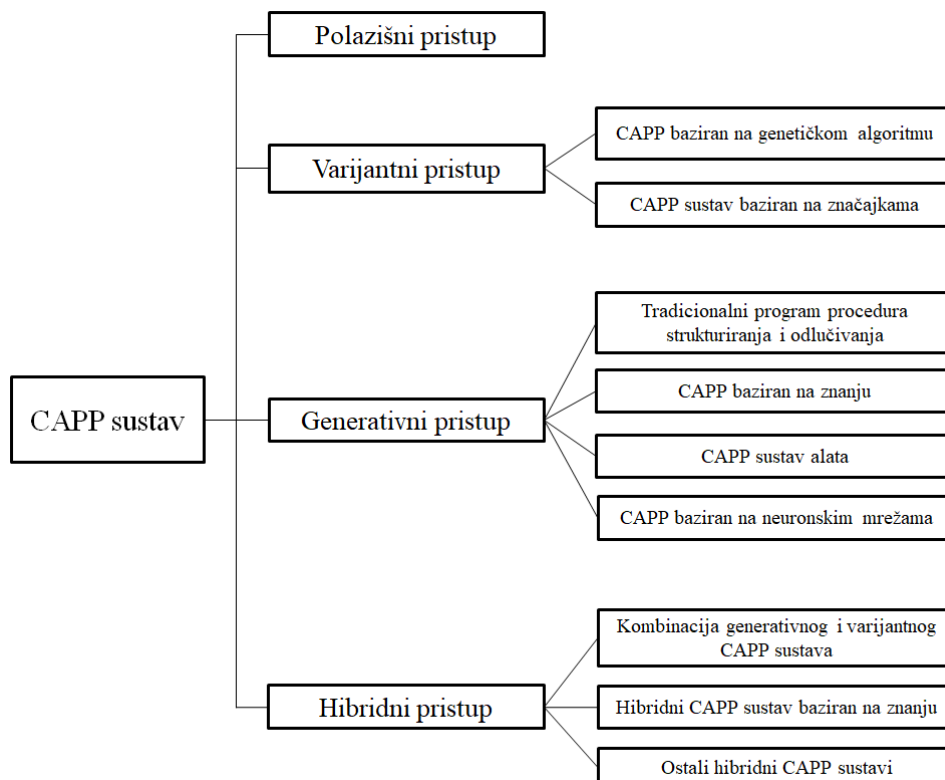
Računalom podržana proizvodnja, CAM (eng. Computer Aided Manufacturing), je korištenje računalne tehnologije za projektiranje, upravljanje i kontrolu tehnoloških i proizvodnih procesa. Na temelju CAD modela vrši se generiranje G koda za obradu na strojevima upravljanim računalima. Danas su gotovo sve vrste obrada temeljene na CAM tehnologijama.

Za razliku od CAD-a, koji služi kao pomoć prilikom modeliranja i konstruiranja proizvoda, procesa i proizvodnih pogona, CAM služi kao programska podrška u proizvodnji, odnosno kontroli CNC strojeva koji se koriste pri obradi i proizvodnji obradaka. Tradicionalno, CAM je shvaćan kao programski alat za numeričko upravljanje (NC) u kojem se pomoću CAD sustava generiraju dvodimenzionalni ili trodimenzionalni modeli.

Korištenjem podataka o geometriji modela, dobivenih iz modela i nacрта kreiranih u CAD sustavu, u CAM programu moguće je generirati putanju alata za različite postupke izrade.

Tipičan proces stvaranja programa za upravljanje CNC strojem, uključuje izradu dijelova i popisa dijelova u CAD programu do krajnje razine te izradu slojeva geometrijskih značajki potrebnih za CAM obradni program [62]CAPP (eng. *Computer Aided Process Planning*) koristi se za projektiranje tehnoloških procesa izrade proizvoda. Radi se o prenosnici između faze dizajna i proizvodnje, a sastoji se u nekoliko faza. Kod projektiranja tehnoloških procesa definiraju se parametri obrade i normirane vrijeme izrade. Dio sustava bazira se na grupnoj tehnologiji koja podrazumijeva kodiranje dijelova prema sličnostima u dizajnu te načinu izrade. Na početku definira polazni materijal, geometrija i karakteristike sirovca nakon čega se odabire tehnologija izrade, redoslijed operacija, alati i strojevi, naprave i mjerni uređaji. Vremena izrade i režimi obrade također su dio CAPP-a, kao važan segment za optimiranje troškova izrade. Sastoji se od kompjuterskih programa koji korisniku omogućuju kreiranje,

pohranjivanje izmjene i ispis plana izrade. Kao takav smanjuje udio rutinskih manualnih operacija pri projektiranju tehnoloških procesa [63].



Slika 13 Klasifikacija CAPP sustava [64]

Na slici 13 vidljiva je klasifikacija vrsta CAPP sustava. Razlikuju se varijantni, generativni i hibridni CAPP sustavi od kojih se svaki sastoji od nekoliko podvrsta, što će detaljnije biti objašnjeno u sljedećim poglavljima, kao i funkcija istog.

4.1.4.1. Funkcija CAPP-a

Proces nastajanja proizvoda započinje dizajnom dijela za koji su zaduženi konstrukteri koji rade po određenim naputcima. Nakon faze dizajna, na temelju izrađenog modela/crteža, tehnolozi projektiraju tehnološke procese pomoću kojih će se određeni dio izraditi, određuju alate, strojeve i parametre obrade te finalno redoslijed operacija.

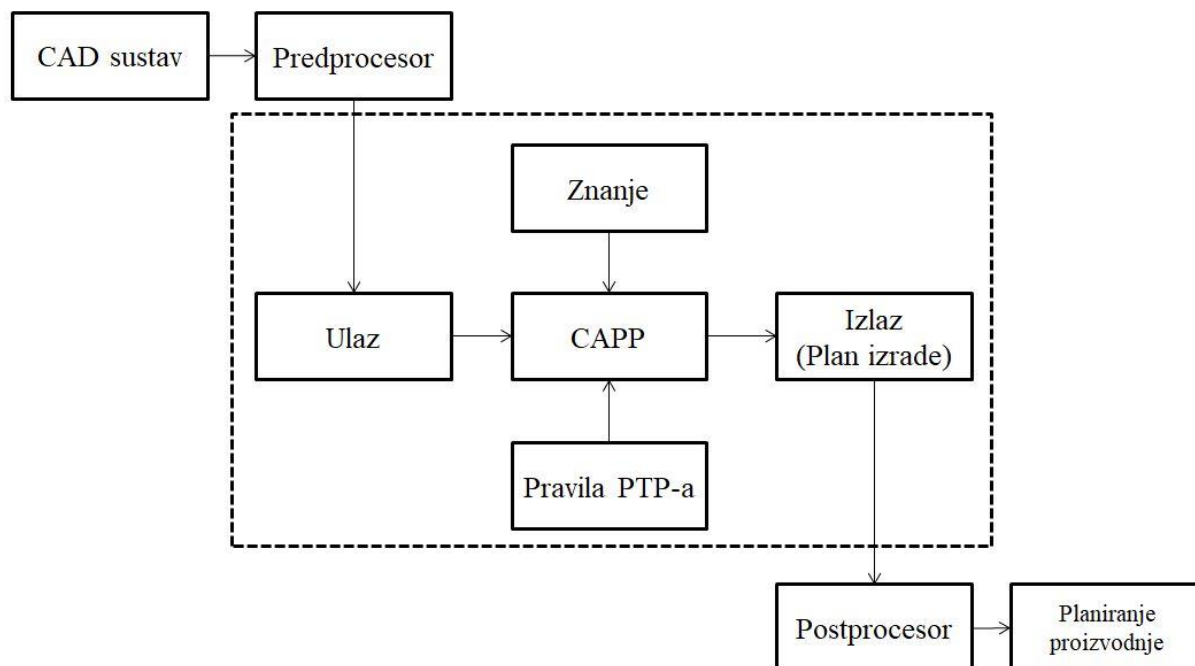
Budući da su ovo dva različita područja često dolazi do nesporazuma između dizajnera/konstruktora i tehnologa. Dijelovi i proizvodi obično nisu prilagođeni mogućnostima tehnologije koja je u tvrtki na raspolaganju pa dolazi do vremenskih i novčanih gubitaka. Do nesporazuma dolazi zbog ne-komunikacije između dva vrlo važna sektora tvrtke – sektora konstrukcija i proizvodnje. Komunikacijski kanal je ili u potpunosti onemogućen ili na njemu postoje određene barijere. Modernizacijom čitavog sustava i

primjenom suvremenih računalnih tehnologija ove prepreke počinju predstavljati sve manji problem.

Automatizacijom se stvara čvrsta poveznica između dva važna segmenta koji smanjuje mogućnost pogreške u planiranju i mogućnosti prilagodbe 3D modela dostupnim tehnološkim postupcima, alatima i strojevima. CAPP stoga omogućuje projektiranje tehnoloških procesa i redoslijeda operacija pomoću raznih vrsta više ili manje naprednih algoritama implementiranih u računalni softver. Jednostavni su za korištenje te omogućuju uštede vremena i novca te prevenciju nastanka pogrešaka u proizvodnji. Dugoročno utječe na kvalitetu proizvoda, ali i na njegovu cijenu koja je prihvatljivija za kupca, a zbog manjih troškova povećava se profit proizvođača [65]

4.1.4.2. Općeniti CAPP model

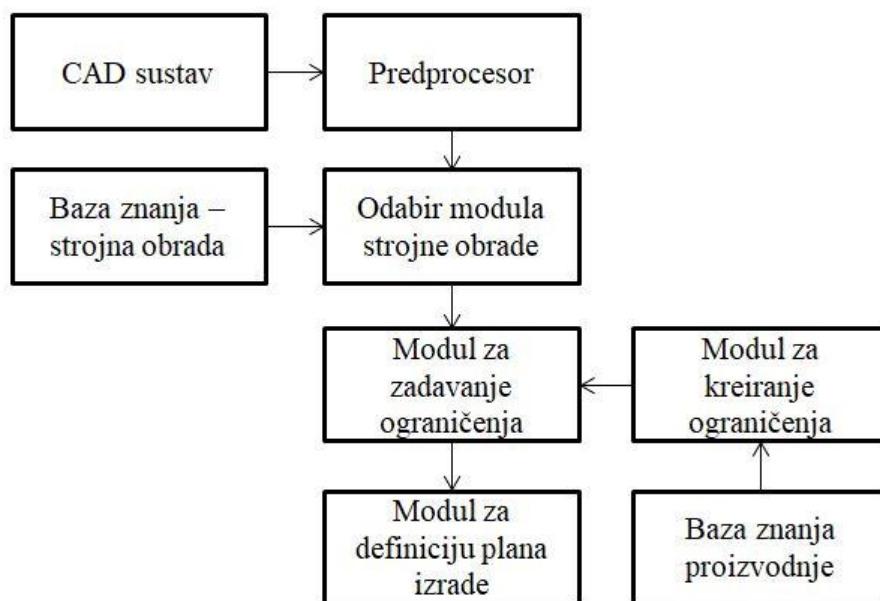
Općeniti CAPP model prikazan je na slici 14, gdje je vidljiv položaj CAPP-a u planiranju proizvodnje te njegova struktura. Proizvod se najprije modelira u odgovarajućem CAD sustavu te se dobivene informacije iz modela obrađuju u predprocesoru. Te informacije služe kao ulazni podaci za CAPP sustav koji već sadrži određeno znanje i pravila po kojim se informacije dalje obrađuju i znanje primjenjuje. Izlazne informacije naknadno se obrađuju u postprocesoru, a rezultat je plan proizvodnje koji sadrži informacije o tehnološkim procesima, korištenim alatima, strojevima, parametrima obrade i redoslijedu operacija [66]



Slika 14 CAPP model [66]

4.1.4.3. Arhitektura CAPP-a

Arhitektura CAPP sustava prikazana je na slici 15, na kojoj su vidljivi segmenti koji čine CAPP i kao takvi utječu na njegovu funkcionalnost i važnost. Informacije iz CAD sustava i predprocesora koriste se za odabir primarnog procesa i ostalih tehnoloških procesa koji se odabiru na temelju podataka iz baze sustava. Na odabir se primjenjuju zadana ograničenja iz druge baze podataka koju sadrži sustav. Pomoću tako obrađenih podataka sustav kreira plan izrade pomoću posebnog modela koji je implementiran unutar njega [66]



Slika 15 Arhitektura CAPP sustava [66]

4.1.4.4. Prednosti korištenja CAPP sustava

Neke od prednosti korištenja CAPP sustava su sljedeće [66]:

- Smanjenje vremena i troškova projektiranja kvalitetnih tehnoloških procesa. Klasični pristup projektiranju tehnoloških procesa obuhvaćao je dulji vremenski period u kojem bi se zahtijevalo znanje nekoliko eksperata. Pri tome je njihovo znanje bilo izuzetno važno uz komponentu iskustva koja je povećavala kvalitetu odabranog tehnološkog procesa. Budući da je mogućnosti mnogo, na kraju se često sve svede na metodu pokušaja i pogrešaka što izazove dodatne troškove zbog pogrešaka koje se mogu desiti pa čak i u nekom drugom trenutku životnog vijeka proizvoda koje snosi tvrtka koja je proizvela proizvod.
- Sistematizacija, kategorizacija i formiranje baze znanja za projektiranje. Nepostojanje arhive vrlo je čest problem u proizvodnim tvrtkama. Neke tvrtke čak ne posjeduju niti

nacrte za određene proizvode, stoga je uvođenjem računalnog sustava s velikim bazama podataka sve stavljeno na jedno mjesto, lako je dostupno i pregledno je.

- Optimizacija tehnoloških procesa. Sustav sadrži sva znanja i iskustva dosadašnjih eksperata uz mogućnost spajanja na internet gdje je znanje univerzalno i sveobuhvatno. Sadrži i podatke o dosadašnjim procesima zbog čega je moguće optimizirati tehnološki proces.
- Veća produktivnost tehnologa. Oni tako troše manje vremena, a i ostaje im vremena za razmišljanje i implementaciju određenih poboljšanja, stoga je njihove produktivnost veća. Za kraće vrijeme u mogućnosti su napraviti isti posao.
- Mogućnost povezivanja s ostalim Ca-x aktivnostima. Osim znanja o projektiranju tehnoloških procesa i redoslijedu proizvodnje, CAPP sustav se povezuje s bazom podataka CAD ili CAM sustava koji sadrže temeljne komponente proizvodnog procesa – podatke o proizvodu, strojevima, alatima i parametrima obrade. Sustav sistematizira ta znanja i optimizira dobivene podatke.
- Smanjene potrebe za visokokvalitetnim tehnolozima, kao i lakše obrazovanje novih tehnologa. Znanje eksperata je prilično skupo, a uvođenjem CAPP sustava nije potrebno da svaki tehnolog bude visokokvalitetan, sustav mu pomaže u radu. Čest je slučaj da u tvrtkama, odlaskom važnog tehnologa u mirovinu, novi tehnolozi kreću od početka zbog nedostatka iskustva što rezultira određenim gubicima.

4.1.4.5. Varijantni pristup CAPP-a

Tradicionalan pristup varijantnog projektiranja tehnoloških procesa i određivanja redoslijeda operacija obuhvaća proučavanje crteža na temelju kojeg se identificiraju slične pozicije u prošlosti. Podaci o njima pronalaze se obično u arhivi gdje su zapisani podaci i o tehnološkim procesima. Ti se planovi izrade adaptiraju ili modificiraju shodno novom zahtjevu.

CAPP sustav omogućuje brz i jednostavan pristup podacima koji se nalaze u računalnoj bazi podataka tehnoloških procesa. Derivirano iz skupnih tehnologija, pozicije su klasificirane i kodirane u familije pozicija – pozicije s atributima dovoljno sličnim zajedničkoj proizvodnoj metodi za sve njih. Svaka familija ima standardni plan izrade koji uključuje sve moguće operacije za familiju i kao takav je pohranjen u sustavu. Standardni plan prilagođuje se novoj poziciji. Kvaliteta tehnološkog procesa dodatno u ovom slučaju zavisi i o individualnom znanju tehnologa.

Prednosti varijantnog pristupa su sljedeće:

- upotreba postojećih proizvodnih podataka i ekspertize,
- oslobađanje tehnologa rutinskih aktivnosti,
- primjena na sve tipove proizvodnje,
- mogućnost nadogradnje promijenjenih proizvodnih tehnologija za nove i stare pozicije,
- uključenje standarda tvrtki,
- plan izrade kompletira poziciju (sve tipove tehnoloških, proizvodnih i poslovnih procesa kao montaža, bojanje, skladištenje, marketing itd.),
- najveća ušteda u pripremnoj fazi projektiranja [64].

4.1.4.6. *Generativni pristup CAPP*

Generativni se pristup bazira na tehnološkim algoritmima koji u sebi sadrže određenu logiku odlučivanja. Koriste se formule i bazni geometrijski podaci na temelju kojih se potpuno automatski generiraju planovi izrade. Upravo je zbog toga generativni pristup izrazito kompleksan i težak za razvoj, zahtjeva specifična znanja i vještine iz raznih područja. IT stručnjaci trebaju razviti okvir sustava, odnosno algoritma, dok su za sve ostalo, zaduženi tehnolzi.

Postoji i semi-generativni pristup koji je kombinacija varijantnog i generativnog pristupa. U prvim koracima radi na principu varijantnog pristupa, no u završnici razrade tehnološkog procesa koristi korake generativnog sustava u nešto modificiranom obliku uz svu logiku odlučivanja, formule, tehnološke algoritme i podatke o geometriji ugrađene u sustav [64].

4.1.4.7. *Uštede korištenjem CAPP-a*

Iz prednosti koje korištenje CAPP sustava donosi, prikazanih u poglavlju 4.1.4.4, proizašle su i konkretne uštede koje se mogu kvalitativno mjeriti. Tako prema nekim izvorima [68] korištenjem CAPP sustava, projektiranje tehnoloških procesa vremenski je smanjeno za 58%, 10% manje je potrebno uložiti direktnog ljudskog rada, 4% je manje materijala potrebno, 12% je manje otpada i 12% ušteda u proizvodnom procesu.

4.1.4.8. *Primjena*

CAPP je primjenjiv u mnogim granama industrije, a posebna se pažnja pridaje strojnoj obradi u kojoj je ovaj sustav najrazvijeniji. Svaki funkcionira na istom baznom principu, arhitektura je slična, no algoritmi za svaki korak su različiti, ovisno o tehnologu. Najprije je razvijen

CAPP sustav za rotacijski simetrične dijelove, a nakon je razvijen sustav za nesimetrične i kompleksnije dijelove koji se također može koristiti u projektiranju tehnoloških procesa [69], [70], [71], [72].

4.1.5. Sustav za automatizaciju proizvodnje (eng. *Manufacturing automation system – MAS*)

Sustav za automatizaciju objedinjuje tokove materijala i informacija. Kod diskretne proizvodnje sastoji se od informacija o broju strojeva, sustavu transporta, upravljačkih jedinicama, računalima te softvera koji nadzire i upravlja. Kod kontinuirane (procesne) proizvodnje MAS se sastoji od uređaja koje kontrolira DCS (eng. *distributed control system*) sustav za nadzor i kontrolu. Cilj je povećati produktivnost, smanjiti troškove, smanjiti višak zaliha u procesu, povećati kvalitetu proizvoda te smanjiti vrijeme proizvodnje.

Važna komponenta MAS-a su metode upravljanja i nadzora strojeva. Radi se o softveru koji prima u određenom vremenskom intervalu plan proizvodnje iz ERP sustava, optimira redoslijed operacija posebnim algoritmima planiranja proizvodnje i resursa, dodjeljuje poslove radnim mjestima i kontrolira rukovanje materijalom te operaciju izrade.

Grupne tehnologije i optimizacijske metode vrlo su važna komponente u ovom dijelu kako bi se poboljšalo iskorištenje resursa, smanjila pripremno-završna vremena te se balansiralo opterećenje strojeva [75].

4.1.6. Fleksibilni proizvodni sustavi

Fleksibilni proizvodni sustavi, kako i naziv nalaže, posjeduju veliki stupanj fleksibilnosti. Razvijeni su kako bi se povećala produktivnost, kvaliteta proizvoda uz smanjenje troškova u uvjetima raznih neizvjesnosti iz internih i eksternih izvora.

Fleksibilnost je svojstvo proizvodnih sustava koje omogućava promjene u operacijama proizvodnje te njihovim mogućnostima čime se ispunjavaju različiti zahtjevi. Postoji nekoliko vrsta fleksibilnosti u proizvodnom sustavu kao fleksibilnost strojeva, tokova vrijednosti, fleksibilnost proizvodnih procesa te fleksibilnost proizvoda.

Fleksibilnost strojeva odnosi se na mogućnost stroja da izvede raznovrsne operacije na dijelovima raznih veličina i vrsta. Kao takva može smanjiti vremena izmjene, pripremno-završna vremena te tako omogućiti ekonomičniju proizvodnju malih serija.

Fleksibilnost tokova vrijednosti omogućuje da jedan dio bude proizveden na nekoliko različitih alternativnih ruta unutar pogona. Tako se smanjuje razina nesigurnosti pri planiranju raspodjele resursa i raspoloživosti strojeva, ali i izbjegavaju se gubici ako dođe do određenih

kvarova ili nepredviđenih događaja. Alternativne rute također minimiziraju opasnosti uskih grla te tako povećavaju produktivnost.

Fleksibilnost procesa je mogućnost prihvatanja promjena unutar proizvodnih procesa i operacija, odnosno mogućnost izvedbe sličnih operacija na sličnim dijelovima na višenamjenskim CNC obradnim centrima.

Fleksibilnost proizvoda je mogućnost promjene karakteristika proizvoda ekonomično i brzo prema zahtjevima kupca, bez većih intervencija, što je jedna od glavnih karakteristika današnjeg tržišta i stjecanja konkurentske prednosti na istom [76].

4.1.7. Komponente fleksibilnih proizvodnih sustava

FPS je po definiciji automatiziran, računalom upravljani proizvodni sustav srednjeg obujma. Koristi se za proizvodnju raznolikih proizvoda bez gubitka vremena na promjenama iz postave za jedan proizvod na drugi.

Komponente FPS-a su sljedeće [77]:

1. Automatizirani uređaji za proizvodnju - uključuju obradne centre s mogućnostima automatske izmjene alata, mjerne uređaje i uređaje za čišćenje. To su višenamjenski strojevi koji izvode operacije sukladno NC instrukcijama s visokim stupnjem fleksibilnosti.
2. Automatizirani sustavi za rukovanje materijalom - uključuje stanice za utovar i istovar, skladišta, međuskladišta, robote i uređaje za transport materijala. Transportni su uređaji većinom automatski navođena vozila, pokretna traka, robot ili njihova međusobna kombinacija. Zadaća je pripremiti, pohraniti i dopremiti materijal (sirovi materijal, poluproizvode i proizvode) između raznih radnih mjesta, mjesta za utovar ili istovar, međuskladišta i skladišta.
3. Automatizirani alati - radi se o uređajima za postav alata, centralno skladište alata i sustav za dopremu alata. Glavna zadaća je priprema alata za obradne centre, transfer alata iz skladišta do obradnog centra, između obradnih centara i natrag u skladište alata.
4. Računalni sustav kontrole - sastoji se od računala i kontrolnog softvera. Kontrolni softver bavi se definicijom plana operacija, raznih poslova, nadzorom istih i računalno upravljanje FMS-a.

4.1.7.1. Dizajn i implementacija FMS-a

Ovakvi sustavi zahtijevaju velike financijske investicije dok s projektom i planom treba oprezno postupiti budući da se od istog očekuju veliki ekonomski benefiti u budućnosti.

Pri definiciji budućeg FMS-a potrebno je odrediti prostorni raspored strojeva, vrstu strojeva, uređaje za rukovanje materijalom, poziciju skladišta i međuskladišta te optimalni organizacijski raspored unutar proizvodnog pogona. Također, potrebno je predvidjeti potražnju u budućnost kako bi se mogao odrediti potreban kapacitet te nakon toga procesi simulacije novog sustava kako bi se računalno mogle izvesti određene korekcije što uvelike smanjuje troškove.

Osim važnosti utjecaja ekonomskog kriterija, pri definiciji i uvođenju FMS-a važno je uzeti i u obzir kriterije pouzdanosti sustava, produktivnost, mogućnosti praćenja sustava i slične karakteristike, odnosno, utjecajne kriterije.

U literaturi [78] je definirano pet koraka uvođenja FMS sustava:

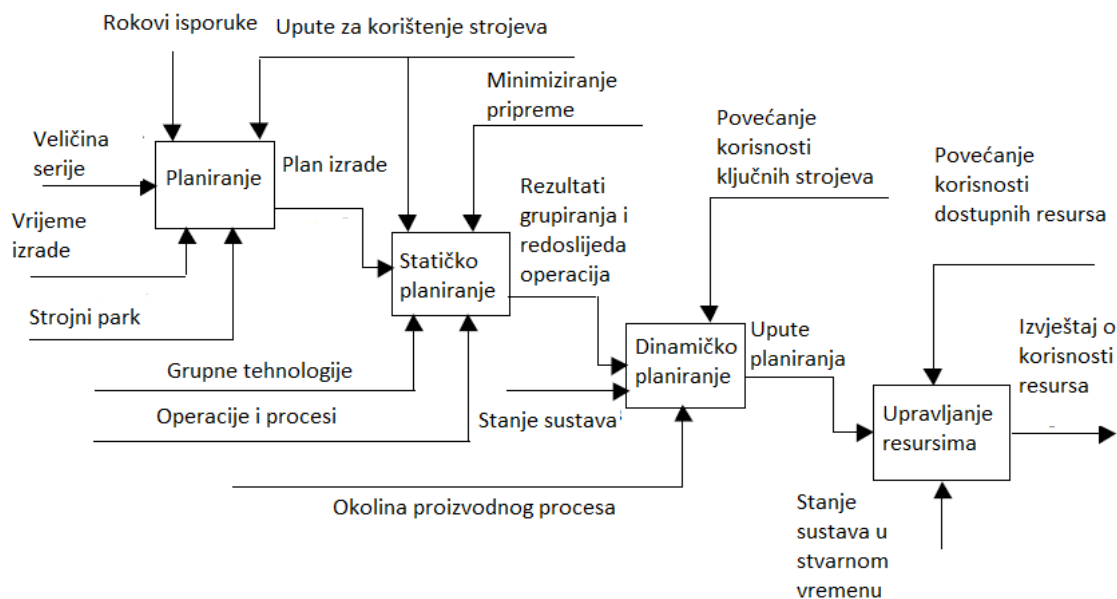
1. definicija ciljeva,
2. definicija kriterija na temelju koji utječu na konačno rješenje (cilj),
3. definicija alternativnih rješenja,
4. rangiranje alternativa i kriterija,
5. analiza rezultata.

Vidljivo je da je pet koraka zapravo standardna procedura višekriterijalnog optimiranja i odlučivanja o čemu će više biti riječi u sljedećim poglavljima.

4.1.7.2. Planiranje i kontrola u FMS-u

Planiranje, balansiranje i kontrola proizvodnog procesa jedan su od najvećih izazova FMS-a. Radnje se nastoje optimizirati uz sljedeće ciljeve:

1. maksimalna produktivnost u određenom vremenskom periodu,
2. minimalno vrijeme promjene unutar grupe proizvoda,
3. minimalni troškovi proizvodnje,
4. maksimalna iskoristivost strojeva.
5. minimalni rad u procesu (eng. *work-in-progress*)
6. minimalno vrijeme izrade određenih dijelova



Slika 16 Planiranje i kontrola u FMS-u [79]

Na slici 16 je prikazana struktura povezana s planiranjem i kontrolom u FMS-u. Vidljivo je kako je kod početnog planiranja, odnosno projektiranja tehnoloških procesa, prisutno nekoliko vrsta ulaznih podataka. Radi se o zadanim rokovima izrade, postojećim vremenskim normama, kapacitetima strojeva te naručenim količinama. Nakon prikupljanja podataka izrađuje se plan izrade uz minimizaciju pripremnog vremena sustava, primjenom grupne tehnologije te ostalih tehnologija na raspolaganju. Sljedeći je korak dinamičko optimiranje, odnosno definicija plana proizvodnje prema raspoloživosti opreme unutar pogona. Provjerom dostupnosti u stvarnom vremenu omogućuje se izrada finalnog plana proizvodnje. Projektiranje tehnoloških procesa i proizvodnje kod FMS-a povezana radnja te kao takva automatizirana.

4.1.7.3. Prednosti i ograničenja FMS-a

Neke od prednosti FMS-a su sljedeće:

- povećana fleksibilnost sustava je ključna prednost i karakteristika FMS-a
- povećanje kvalitete proizvoda, povećano iskorištenje opreme
- smanjenje troškova opreme, *work-in-progress*, trošak rada i potrebnog fizičkog prostora za obavljanje rada
- smanjena vremena izrade i odgovora na zahtjeve tržišta
- financijski benefiti kao posljedica prethodno navedenih karakteristika

Ograničenja FMS-a su većinom ekonomske prirode jer implementacijom istog potrebno je uložiti velika novčana sredstva na početku, što često manje tvrtke nisu u mogućnosti si priuštiti. Osim financijske prirode, ograničenja se javljaju u implementaciji i dizajnu novog načina poslovanja tvrtke koji je prilično kompleksan, dok zbog dinamičnog okruženja na tržištu ponekad se novi koncept neće isplatiti sve dok se u potpunosti ne realizira, odnosno implementira unutar proizvodnog pogona što može izazvati velike gubitke [79].

4.2. Industrija 4.0 – hardver i softver – kibernetско-fizički sustavi

Hardverski sustavi i komponente potrebne za postizanje koncepta Industrije 4.0 slični su dosadašnjim idejama, predstavljenim kroz koncept CIM-a i fleksibilnih proizvodnih sustava, no na većoj razini napretka te uz mnogo novih inovativnih funkcionalnosti.

Inovativnost Industrije 4.0 leži u kibernetско-fizičkim sustavima (eng. *cyber-physical systems* - CPS), novoj generaciji sustava s integriranim računalnim i fizičkim mogućnostima koji imaju mogućnost međusobne interakcije i interakcije s ljudima.

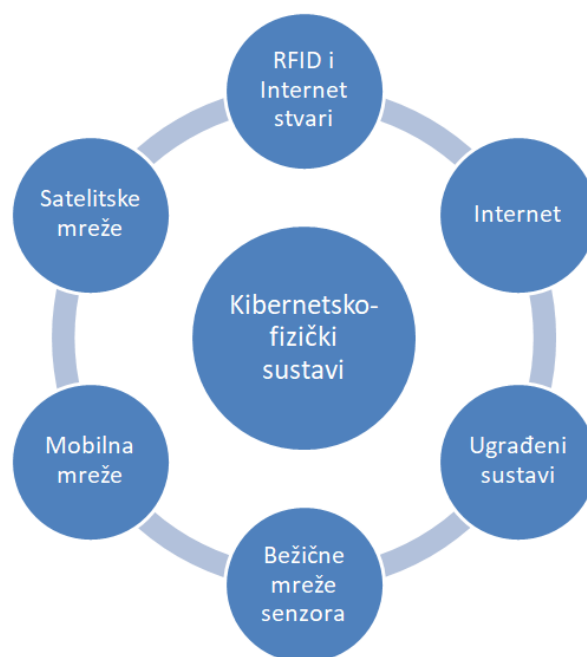
Njihova realizacija danas je moguća zbog povoljnog razvoja znanstvenih metoda kao prediktivne analize, raznih metoda optimizacije, filtriranja podataka, robusne i stohastičke kontrole itd. Istovremeno su se razvili i načini programiranja u stvarnom vremenu uz posebne programske jezike, metode vizualizacije i sistemske softvere koji omogućuju pouzdanost i sigurnost čitavog sustava.

CPS integrira znanje i inženjerske principe pomoću metoda iz raznih znanstvenih disciplina kako bi se razvio novi funkcionalni sustav s vlastitim prednostima koji može biti primijenjen u praksi.

Razvojem se povećava kompleksnost komponenata CPS-a, stoga je vrlo bitna mogućnost uvida u sve podatke o dizajnu i mogućnostima korisniku kako bi se iskoristio pun potencijal opreme te mogao dobro funkcionirati unutar sustava.

Sustav je kontroliran u realnom vremenu od strane kompleksnih računalnih algoritama, a sve se informacije prenose preko interneta i dostupne su svim korisnicima. Dobra povezanost jedna je od važnih karakteristika kako bi se podaci mogli prenijeti brzo i sigurno do krajnjeg korisnika, koji ne treba nužno biti čovjek, već dolazi i do stalne komunikacije između strojeva.

Primjeri CPS-a su autonomni automobilske sustavi, medicinsko motrenje, sustavi za kontrolu raznih proizvodnih procesa, robotske sustavi, automatsko navođenje aviona itd [80].



Slika 17 Struktura CPS-a [80]

Na slici 17 prikazane su komponente CPS-a. Najvažnija je mreža, odnosno poveznica između raznih dijelova i korisnika, koja je često bežičnog karaktera. Ugrađeni sustavi su fizički dijelovi koji omogućuju prikupljanje i pohranu podataka koji se dalje u sustavu selektiraju, obrađuju i na temelju njihova stanja u realnom vremenu izdaju određene naredbe koje opisuju trenutno stanje sustava te radnje koje je potrebno poduzeti ili čak odluke koje je potrebno donijeti.

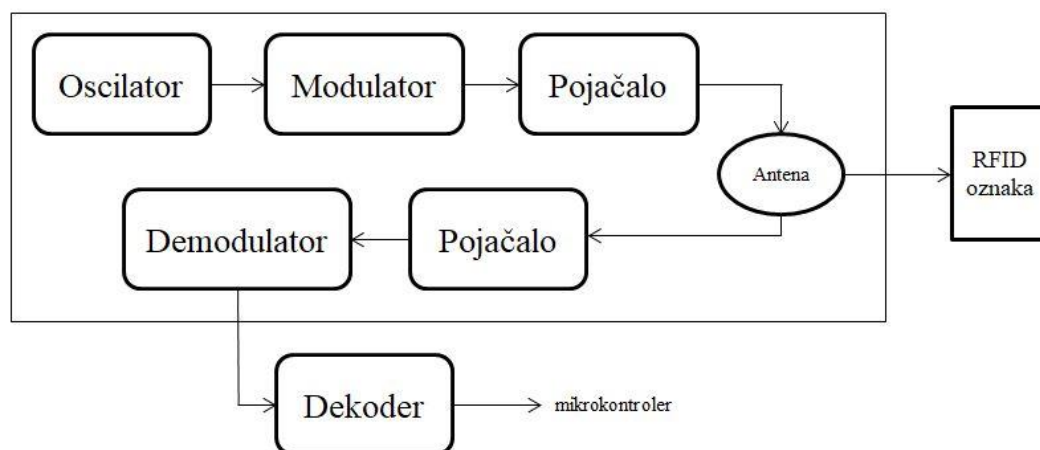
Osim interneta, za prijenos podataka koristi se i RFID tehnologija (slika 18) koja koristi radio frekvenciju kako bi se razmjenjivale informacije između prijenosnih uređaja/memorija i host računala. RFID sustav obično se sastoji od oznake koja sadrži podatke, antena koja komunicira s tagovima i kontrolera koji upravlja i nadzire komunikacijom između antene i računala. Oznake se nalaze na ambalaži ili na proizvodu i predstavljaju bazu podataka koja putuje zajedno s proizvodom.

U svojem najjednostavnijem obliku (čitanje) RFID se koristi kao zamjena za barkod tehnologiju. Prednosti koji nudi je 100% točnost čitanja, sposobnost da izdrži različite vremenske uvjete te isključuje potrebu da proizvod bude u vidnom polju čitača. U naprednijem obliku (čitanje i pisanje) RFID može biti upotrijebljen kako dinamički promjenjiv medij koji omogućuje korisnicima da prema potrebi sadržaj zapisa mijenjaju kada i koliko puto to žele. U još naprednijem stanju labela su pričvršćene proizvodima tijekom proizvodnje i koriste se u cijelom procesu opskrbe (od proizvodnje, preko prodaje do krajnjeg

korisnika). RFID oznake koriste se kako bi stvorili «pametan proizvod» koji može komunicirati sa svojom okolinom [81].

Performanse RFID sustava određeni su sljedećim kriterijima:

- memorijskim kapacitetom tagova,
- brzinom prijenosa podataka,
- radni domet,
- mogućnost operacija s više tagova u polju,
- radne temperature,
- RF frekvencija na relaciji tag – antena,
- mogućnosti povezivanja.



Slika 18 RFID princip rada [81]

Mobilne su mreže često korištene i iznimno korisne kod CPS-a, budući da svaki korisnik (čovjek) može upravljati sustavom ili dobiti uvid u stanje sustava preko mobilnog uređaja, odnosno pametnog telefona. Povezivanje sa sustavom moguće je neovisno o lokaciji korisnika, već je potrebna mobilna aplikacija i signal kako bi pristupio sustavu i krenuo s radom. Pametne je telefone moguće koristiti i unutar proizvodnog pogona, posebno specijalizirane za rad sa sustavom te spojene na lokalnu mrežu kako ne bi došlo do narušavanja sigurnosti ili kvalitete rada [82].

4.2.1. Dizajn kibernetско-fizičkih sustava

Kompleksni sustavi kao što su CPS zahtijevaju multidisciplinarni pristup u dizajnu, stoga je razvijen 5C princip [83] kako bi se osigurao što jednostavniji i pouzdaniji princip gradnje novog sustava.

1. Povezivanje (eng. *Connection*)

- Povezivanje je prvi korak u dizajnu CPS-a, potrebno je definirati mrežu senzora, njihovu međusobnu povezanost i smjerove komunikacije. Važno je da mreža ne bude zagušena stalnim priljevom nepotrebnih podataka, ali i postoji pravilna izmjena potrebnih podataka između dva uređaja.

2. Konverzija (eng. *Conversion*)

- U drugom je koraku potrebno uskladiti oblik podataka kako bi se u svakom dijelu sustava s njima moglo manipulirati. Također, u ovom koraku je potrebno definirati napredne analitičke metode obrade te načine utvrđivanja stanja strojeva iz aspekta održavanja

3. Kibernetička razina (eng. *Cyber level*)

- Koncept Industrije 4.0 zahtijeva postojanje digitalnog blizanca tvrtke. To znači da su sve komponente hardverskog, softverskog, ali i organizacijskog karaktera provedene kroz određeni simulacijski softver čime se njihova funkcionalnost ispituje prije realizacije u praksi. Također, to je jedan od načina optimizacije, kako bi se određeni nedostaci uklonili već na početku.

4. Razina prepoznavanja (eng. *Cognition*)

- Određuju se realne simulacijske metode koje će se koristiti u praksi, metode dijagnostike te metode odlučivanja.

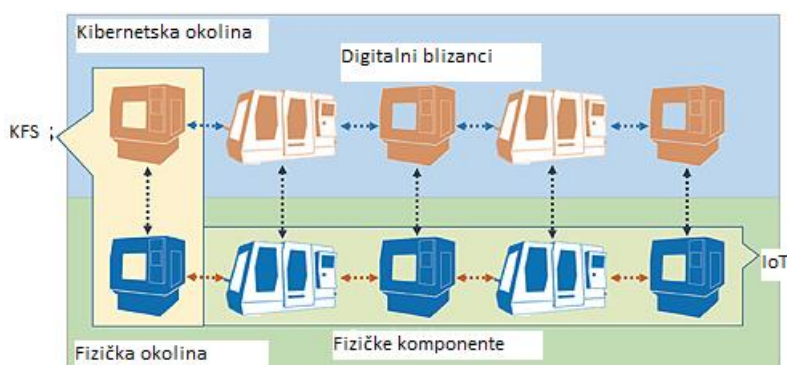
5. Konfiguracija (eng. *Configuration*)

- Mogućnost samostalne provjere stanja sustava, provjera samooptimizacije u realnom vremenu i samoprilagodbe sustava na promjene [84].

4.2.1.1. Digitalni bliznac

Novost u funkcioniranju sustava u Industriji 4.0 s obzirom na ranije predstavljane koncepte jest postojanje digitalnog blizanca. Radi se o simulacijskom modelu svakog dijela organizacije/tvrtke/proizvodnog pogona, kako bi se u realnom vremenu brzo i efikasno moglo

pratiti trenutno stanje, testirati razne modifikacije, provoditi „što ako“ (eng. *what-if*) scenarij, ali i kontinuirano optimirati proizvodne i poslovne procese (slika 19).



Slika 19 Digitalni blizanac – ilustracija sustava [84]

Digitalni se blizanac također može definirati kao digitalni profil u stalnom razvoju, povijesnog i sadašnjeg ponašanja fizičkih objekata ili proizvodnih procesa koji postoji s ciljem unapređenja poslovanja.

Bazira se na masivnom i kumulativnom mjerenju podataka u stvarnom vremenu u raznim dimenzijama. Prikupljeni podaci stvaraju profil objekta ili proizvodnog procesa u digitalnom svijetu kojime se dobiva uvid u stanje sustava, produktivnost ili slične stvari koji iniciraju radnje u stvarnom svijetu kako bi došlo do promjena u dizajnu proizvoda ili proizvodnom procesu.

Razlikuje se od tradicionalno 3D modeliranja (CAD), ali i od standardnog senzorskog "Internet-Of-Things" rješenja. Dok su mogućnosti CAD sustava prilično ograničeni na virtualno okruženje, a IoT sustavi omogućuju mjerenje, obradu i prikupljanje podataka iz raznih mjesta (senzora), digitalni blizanci omogućuju definiciju interakcija između komponenata kroz cijeli njihov životni ciklus.

Korištenjem digitalnog blizanca moguće je koristiti prediktivnu analizu s pouzdanijim rezultatima u uvjetima nesigurnosti [83].

Digitalni blizanac je kreiran kako bi se rekreirali komplicirani proizvodni ili poslovni procesi čiji je ishod u fizičkom svijetu teško predvidjeti, a odnosi se na cijeli životni ciklus proizvoda. Iz tog je razloga u raznim slučajevima moguće kreirati digitalnog blizanca.

Radi se o virtualnoj replici koja izvještava o tome što se u stvarnom vremenu događa unutar proizvodnog pogona. Podaci se mogu prikupljati s mnoštva senzora distribuiranih u fizičkom svijetu te tako omogućiti računanje raznih veličina, odnosno mjera produktivnosti tvrtke.

Analiza se provodi kontinuirano dok je tijekom vremena moguće predvidjeti trendove te usporediti iste s idealnim modelom, odnosno predviđenim ciljem.

Glavne komponente/karakteristike digitalnog blizanca su sljedeće [84]:

1. Senzori. Senzori su distribuirani u svakom dijelu proizvodnog procesa. Kreiraju signale koji omogućuju blizancu da prikupi operacijske i ostale podatke iz stvarnog svijeta u stvarnom vremenu.
2. Podaci. Operacijski i ostali podaci koji se prikupljaju iz senzora se agregiraju i kombiniraju s podacima iz ostalih dijelova organizacije kao popis materijala ili strukture proizvod (eng. *bill of materials* (BOM)), specifikacijama dizajna proizvoda i informacijskih sustava. Podaci mogu sadržavati i razne tehničke crteže ili podatke o reklamacijama kupaca.
3. Integracija. Senzori komuniciraju podatke digitalnom svijetu preko integracijske tehnologije. Ona uključuje komunikacijska sučelja i sigurnosne sustave te je kao takva poveznica između fizičkog i digitalnog svijeta i obrnuto.
4. Analiza. Analitičke tehnike analiziraju podatke s posebnim simulacijskim i vizualizacijskim rutinama kako bi digitalni blizanc stvorio izvještaje i korisniku dao uvid u rezultate.
5. Digitalni blizanc. Vodeća zadaća identificirati netolerabilne devijacije s obzirom na zadane optimalne uvjete raznih dimenzija. To se koristi za optimizaciju i unapređenje poslovanja. Može implicirati radnje koje će se provesti u stvarnom svijetu.
6. Pokretači. Kada se određena radnja treba realizirati u stvarnom svijetu, digitalni blizanc je pokretač ljudske intervencije, odnosno okidač fizičkih procesa proizvodnje.

4.2.1.2. Nastanak digitalnog blizanca

Kod nastajanja digitalnog blizanca potrebno je posjedovati informacije iz cijelog životnog ciklusa - od dizajna preko korištenja i održavanja do korisničke primjene. Izazov je integrirati fizički svijet u stvarnom vremenu preko prikupljanja podataka sa senzora.

U literaturi [85] je usvojena konceptualna struktura digitalnog blizanca.

Strukturu je moguće opisati preko šest implementacijskih koraka:

1. *Kreiranje*. Korak kreiranja obuhvaća opremanje fizičkih procesa (strojeva, radnih mjesta...) sa sensorima koji će mjeriti kritične veličine. Uzete mjere (podaci) mogu se svrstati u dvije kategorije: operacijske mjere prikaza fizičkih performansa dijelova

sustava te mjere vanjskih utjecaja na sustav i procese. Prikupljene mjere (podaci) transkriptiraju se u digitalne poruke preko enkodera zbog sigurnosnih razloga.

2. *Komunikacija*. Korak komunikacije omogućava povezanost između različitih fizičkih procesa i dijelova na digitalnoj platformi. Jedna je od najvećih prednosti korištenja digitalnog blizanca je poveznica između senzora, korisničkog sučelja i sigurnosnog sustava.
3. *Agregacija*. Korak agregacije uvodi podatke u repozitorij, u obliku spremnom na obradu. Obično se radi u oblaku (eng. *cloudu*) čime je moguće dobiti skalabilnu strukturu visoke agilnosti uz smanjenje troškova pri uvođenju promjena.
4. *Analiza*. U ovom se koraku podaci analiziraju i vizualiziraju naprednim metodama. Razvijaju se iterativni modeli koji omogućuju uvid u stanje i stvaraju sustave za podršku pri odlučivanju.
5. *Uvid*. Prikupljeni i obrađeni podaci se u koraku uvida prikazuju u fizičkom svijetu u više različitih dimenzija kako bi se dobio uvid u mjesta gdje su potrebne određene intervencije ili promjene.
6. *Akcija*. Prijedlozi dobiveni od virtualnog sustava u finalnom se koraku primjenjuju na fizički sustav. Rezultati se ponovo preko dekodera prenose u stvarni sustav gdje se unose promjene.

4.3. Projektiranje tehnoloških procesa

Nakon što je dizajn proizvoda razvijen i 3D model je definiran, slijedi projektiranje tehnološkog procesa, odnosno definiranje operacija kojima će proizvod biti izrađen te njihovih popratnih karakteristika. Postoji nekoliko različitih metoda ili preporuka procedura za PTP, a odabir ovisi o tehnologije. Ovisno o njegovom znanju i iskustvu, on odabire metodu za koju smatra da je najpovoljnija i primjenjuje ju na novi proizvod [86].

Ako već u arhivi postoji sličan proizvod, moguće je da će tehnolog odlučiti na prethodno definiran tehnološki proces. pogotovo ako se radi o varijanti proizvoda koji je vrlo sličan nečemu što je tvrtka već proizvela. No, ako se radi o novom proizvodu, potrebno je odrediti tehnološke procese sukladno obliku, materijalu, dostupnim sirovcima, tolerancijama, zahtjevima kvalitete površine, naknadne toplinske ili površinske obrade. Postoje razvijeni prijedlozi, postupci koje predlaže Halevi [73], ASM [74] ili drugi kojima se određuju točne operacije nakon kojih je potrebno odabrati strojeve, alate i parametre strojne obrade [75].

4.3.1. Tradicionalni pristup

Tradicionalni pristup projektiranja tehnoloških procesa u malim i srednjim tvrtkama u Hrvatskoj baziran je na znanju i iskustvu jedne osobe ili tima suradnika. Radi se o tehnolozima koji svoje znanje ponekad ne baziraju na obrazovanju već na iskustvu. Njihov je pristup obrazovanju također tradicionalan, bez usmjeravanja na kontinuirano unapređenje, odnosno cjeloživotno učenje te bez korištenja modernih sustava kao što je CAPP.

To je jedna od većih prepreka s kojom se potrebno nositi tijekom implementacije koncepta Industrije 4.0. Takvi se zaposlenici često teško nose s promjenama, pružaju otpor koji se povećava kada su u pitanju i potrebna financijska ulaganja u novu opremu, digitalizaciju postojeće, ali i edukaciju zaposlenika. Budući da su promjene nužne, postojeća teorijska rješenja Industrije 4.0 je potrebno sagledati i kritički obraditi.

Unutar tvrtke je potrebno pokrenuti novu inicijativu za povezivanjem svih proizvodnih resursa, prikupljanjem podataka i izmjenom informacija sa stalnom kontrolom kvalitete, tehnoloških i proizvodnih procesa. Osim u sustav, znanje je potrebno ugraditi i u proizvod te se tako dolazi do pojma "pametnog proizvoda" koji je na neki način digitaliziran u svakoj fazi svog životnog ciklusa. U tradicionalnom pristupu, odjel PTP rijetko ili slabo je povezan s ostalim odjelima unutar tvrtke. To se posebice odnosi na odjel planiranja proizvodnje čija je povezanost esencijalna. Tehnolog ponekad nema uvid u stvarno stanje unutar proizvodnog pogona, nema uvid u trenutnu i buduću raspoloživost strojeva što može dovesti do budućih zastoja i neplaniranih povećanja rokova isporuke. Implementacijom novog koncepta I40, osim automatskog generiranja plana izrade, moguće je tehnologiju izrade prilagoditi trenutnoj raspoloživosti strojeva i resursa, dok sustavi za potporu odlučivanju integrirani u novi sustav omogućuju brzo i decentralizirano donošenje odluke.

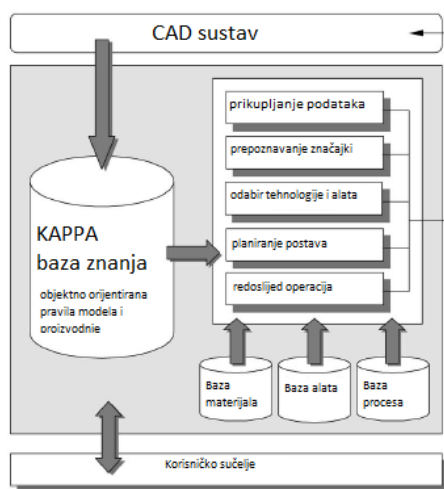
Budući da se svi podaci nalaze u oblaku, njima je moguće pristupiti s bilo kojeg mjesta te je za to potrebna samo internetska konekcija zbog čega nema ograničenja zbog trenutne prisutnosti tehnologa, ali i novim organizacijskim rasporedom i načinom edukacije odluke ove vrste važnosti ne bi bile vezane isključivo za jednu osobu.

4.3.2. Računalni program za projektiranje tehnoloških procesa „ProPlanner“

ProPlanner je računalni sustav koji je stvoren u svrhu određivanja redoslijeda operacija 2001. godine. Integrira nekoliko kompjuterskih alata koristeći bazu znanja i rasuđivanje paradigme s obzirom na ograničenja tehnoloških procesa i mogućnosti postojećeg strojnog parka. Sustav sadrži pet ključnih modula za prikupljanje informacija, prepoznavanje oblika, projektiranje

operacija obrade, izbor alata, izbor parametara obrade i redoslijeda operacija. Kombinira informacije iz faze dizajna i prilagođuje ih projektiranju tehnoloških procesa. Povezuju se i s bazama podataka (slika 20) koje se sastoje od podataka o proizvodima i dodatnim bazama koje sadrže općenite informacije o tehnološkim procesima, alatima i materijalima te sadrže korisničko sučelje za komunikaciju i upravljanje.

prikazuje shemu ProPlanner sustava. Povezuje dva velika područja – CAD sustav i KAPPA-PC sustav za razvoj ekspertnih sustava koji upravlja s glavnim modulima koji se generiraju s obzirom na podatke dobivene iz tri glavne baze podataka – bazi materijala, alata i tehnoloških procesa.



Slika 20 Shema ProPlanner sustava [87]

Program pretpostavlja da postoji nekoliko mogućih shema svakog zadanog oblika te on s obzirom na to generira sve moguće kombinacije redoslijeda operacija. Glavno ograničenje (kriterij) pomoću kojeg sustav dolazi do optimalnog rješenja je najmanji broj izmjene alata. Osim toga, uzima u obzir i dimenzijske tolerancije i zahtjeve na površinsku hrapavost [87].

4.3.3. ISOS – genetski algoritam

ISOS (eng. *Integrated setup planning and operation sequencing*) je sustav koji koristi genetski algoritam i glavna mu je zadaća popuniti funkcionalnu rupu između CAD-a i CAM-a. Dan je kao prijedlog, odnosno nadogradnja postojećih CAPP sustava jer rezultati njihova rada nisu bili optimalni. Osim određivanja redoslijeda operacija, ISOS se bavi i planiranjem postavka strojeva i operacija te daje rezultate bliže optimalnom rješenju. Glavni je cilj uskladiti dva velika kriterija koja utječu na proizvodnost – ukupno vrijeme izrade i cijenu proizvodnje. Do rješenja se dolazi analizom i obradom podataka dobivenih iz geometrijskih značajki izratka koji su glavni ulazni podaci. ISOS se bazira tako na tri elementa –

optimizirani plan postavki operacija, optimizirani plan redoslijeda operacija i optimiziran odabir stroja, alata i parametara obrade. Ograničenja pristupa leže u broju osi stroja, odnosno načinu gibanja po osima, prednosti vezanih obrada (obrada koje nužno trebaju slijediti jedna nakon druge, kao npr. obrade u nekom provrtu), dostupnim steznim napravama (prednost imaju stezne naprave koje se najčešće koriste), povezanosti određenih značajki geometrijskim tolerancijama (parametri obrade određuju se jedna u odnosu na drugu značajku) te ustaljenim preporukama za kvalitetnu obradu.

Genetski algoritam oponaša proces prirodne evolucije u kojoj preživljavaju najbolja rješenja uz strukturirane i slučajne izmjene informacija. Prva faza je inicijalna populacija koja opisuje predstavnike mogućih rješenja. Svaki element (gen) predstavlja operaciju, a poredak elemenata u mreži (kromosomu) je redoslijed operacija. Finalni rezultat je plan izrade predstavljen slučajnom kombinacijom gena. Operator mutacije je slučajan odabir određenih rješenja. Funkcija troškova u ovom slučaju je pokazatelj kvalitete odabranog tehnološkog procesa i redoslijeda. Sastoji se od kriterija amortizacije strojeva i alata, troškovima promjene alata i parametara te dodatnih troškova zbog određenih gubitaka. To je optimizacijska funkcija algoritma čiji je minimum optimalno rješenje. Ovim se genskim algoritmom uspjelo približiti optimalnom rješenju jer su osim tehnoloških uvedeni i ekonomski kriteriji koji su postavljeni kao glavna funkcija cilja [88].

4.3.4. Problem putujućeg trgovca – SAT algoritam

Problem putujućeg trgovca rješava određivanje redoslijeda operacija implementacijom u tzv. SAT tehniku (eng. *Simulated annealing technique*). SAT je metaheuristički algoritam kojem je cilj minimizirati matricu troškova, što daje optimalno rješenje s najnižom cijenom, ali i nastoji smanjiti vrijeme obrade podataka. Matrica troškova kreira se s obzirom na dizajn proizvoda i attribute njegove proizvodnje (broj strojeva, izmjena alata, tehnološka vremena). Rezultat, redoslijed operacija je Hamiltonova ruta minimalnog troška koja prolazi kroz vrhove (attribute) jednom. To je procedura u literaturi poznata kao problem putujućeg trgovca. Svaki kriterij obrade prolazi kroz SAT algoritam koji evaluira troškove i na temelju njega se kreira matrica troškova. Optimizacija matrice je np-težak kombinatorni problem, stoga se rješava heurističkim metodama. Dobivene je rezultate moguće primijeniti u praksi, a prvotna namjera minimizacije troškova i smanjenja vremena proračuna je uspješno postignuta [89].

4.3.5. SA algoritam

SA (eng. *Simulated annealing*) algoritam temelji se na geometrijskim karakteristikama izratka.

Geometrijske i ne-geometrijske kompleksnosti koje se javljaju u čitavom sustavu stavljene su na centralno mjesto razmatranja te se na temelju njih stvara algoritam koji omogućuje optimalno određivanje redoslijeda operacije. Također, uzeta je u obzir i orijentacija dijela pri stezanju, kompatibilnost alata, dostupnost obratka, dimenzijske tolerancije, geometrijske tolerancije i zahtijevana kvaliteta površine. Pritom se generira indeks promjene položaja, promjene alata i indeks kontinuiranosti obrade. Indeksima su dodijeljene funkcije važnosti i zajednička funkcija cilja čiji optimum predstavlja redoslijed operacija. Algoritam traži globalni optimum uz pretpostavku minimizacije broja stezanja i izmjene alata te maksimizaciju kontinuiranosti obrade [90].

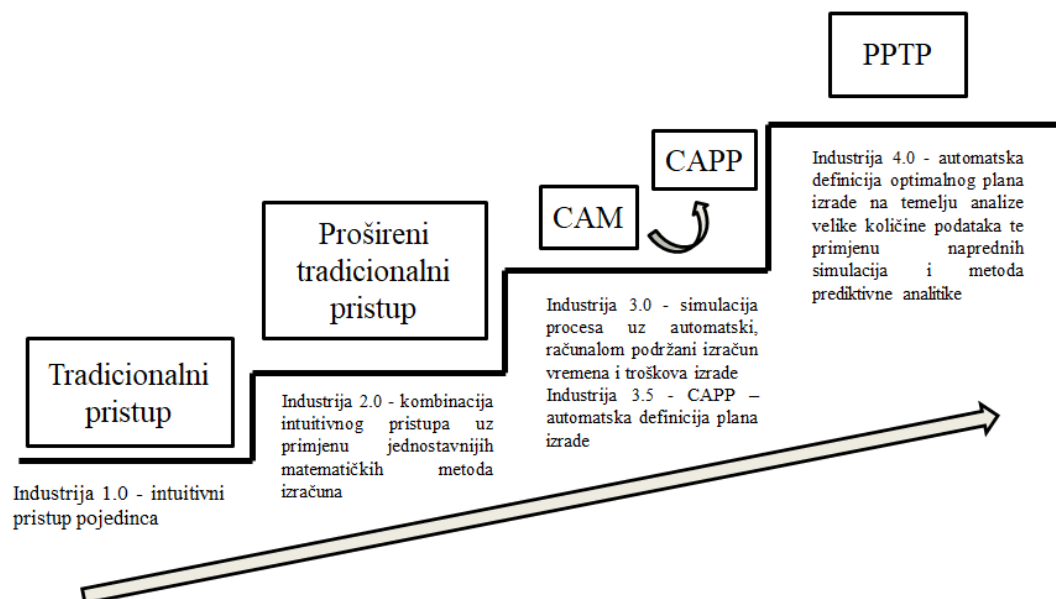
4.4. Projektiranje tehnoloških procesa u Industriji 4.0

Uz fizičke, softverske i organizacijske promjene u tvrtki, uvođenjem koncepta Industrije 4.0 dolazi do promijene ljudskih profesija i načina rada. To nužno ne znači da će se ljudski rad u potpunosti zamijeniti s robotima, već da će se razviti nove profesije, a one dosadašnje će se promijeniti. Ljudi više neće imati ulogu u manualnom radu, ali su od velike važnosti u kontroli, inovativnosti, razvoju i optimizaciji radne okoline i postojećih proizvodnih procesa.

Promjene će biti, između ostalog, zabilježene i u području projektiranja tehnoloških procesa, sada vrlo važnog dijela lanca vrijednosti. Budući da novim konceptom dolazi do fleksibilizacije proizvodnje, što znači da će u nepredvidljivim okolnostima, prema zahtjevima kupca, odnosno tržišta, doći do čestih promjena u obliku i funkciji proizvoda, ali i u vrsti proizvoda kojeg je potrebno proizvesti u što kraćem roku, što bolje kvalitete te uz što manje troškove.

4.4.1. Okvir razvoja projektiranja tehnoloških procesa sukladno industrijskim revolucijama

Sukladno karakteristikama industrijskih revolucija te karakteristikama projektiranja tehnoloških procesa opisanog u poglavlju 4, definiran je okvir razvoja projektiranja tehnoloških procesa prema industrijskim revolucijama (slika 21).



Slika 21 Razvoj PTP-a prema industrijskim revolucijama

Tradicionelni pristup bazira se na znanju i iskustvu jedne osobe, tehnologa, dok se plan izrade generira manualno i intuitivno, što se poistovjećuje s Industrijom 1.0. Prošireni tradicionalni pristup djelomično koristi jednostavne matematičke metode ručnog proračuna pripremno-završnog, pomoćnog i tehnološkog vremena, kao i troškova izrade, što se poistovjećuje s Industrijom 2.0. Korištenje CAM softvera povezuje se s korištenjem računala i automatizacijom rada, tako i 3. Industrijskom revolucijom, čime se omogućuje simulacija izrade na 3D modelu te automatski proračun vremena i troškova. Sljedeći korak su CAPP sustavi, spoj između CAD i CAM sustava, kao napredniji način definicije plana izrade koji se poistovjećuje s industrijom 3,5. Finalno stanje kojem se teži, prema principu Industrije 4.0 je sustav „Pametnog projektiranja tehnoloških procesa (PPTP)“, u potpunosti digitaliziran sustav, orijentiran ka znanju koji je direktno povezan s planiranjem proizvodnje. Koristi metode prediktivne analitike i automatski kreira plan izrade koristeći podatke iz arhive, dostupnost strojeva i ostale potrebne podatke koji se prikupljaju u cijelom lancu vrijednosti.

4.4.2. Pametno projektiranje tehnoloških procesa (PPTP)

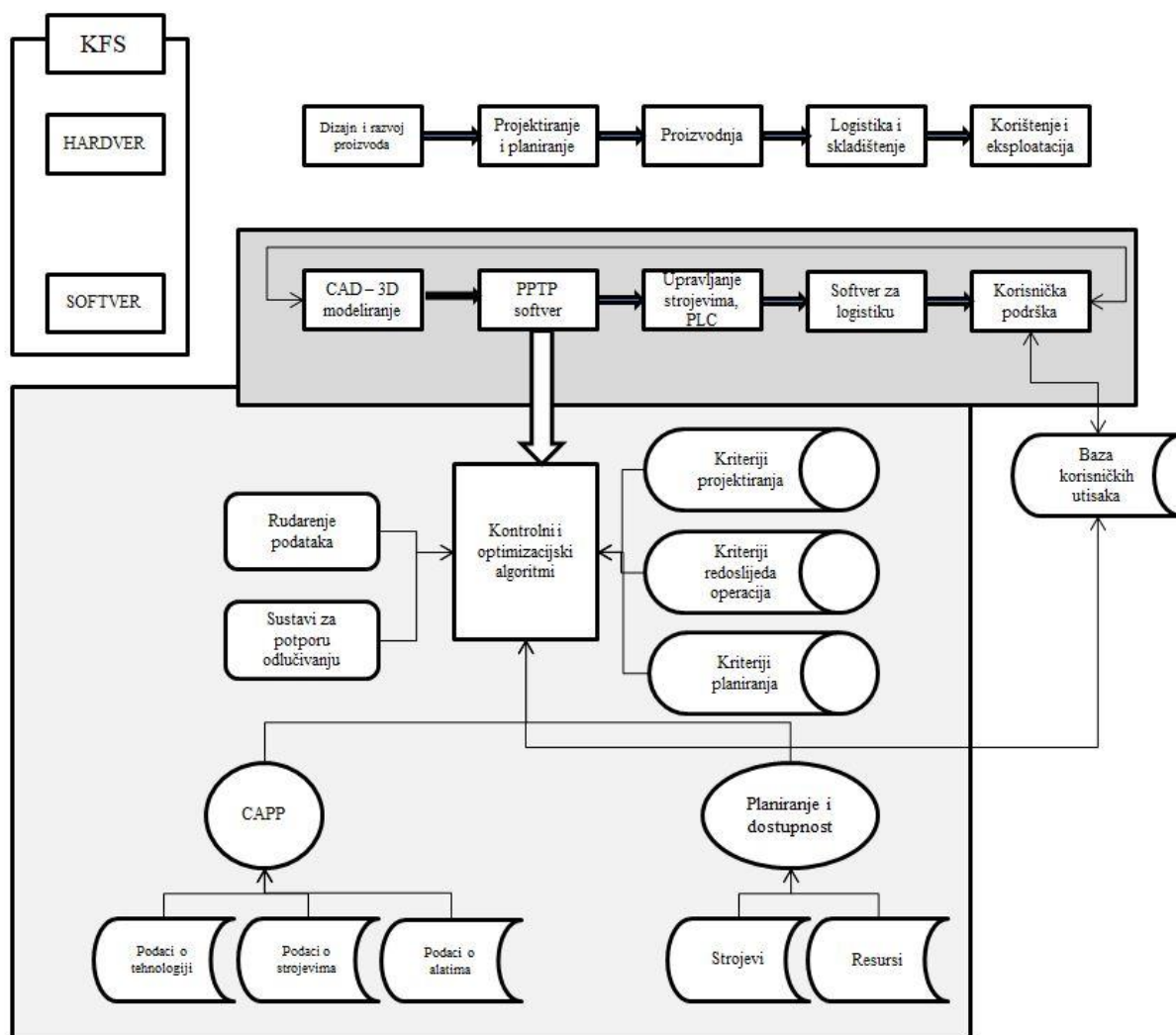
Dosad je termin "pametnog proizvoda" u literaturi većinom korišten u smislu sadržaja informacija o zahtjevima korisnika i njihove povratne informacije, a sada je ideja isti termin nadopuniti kako bi doprinijelo korisnosti proizvodnje, uz to i projektiranju tehnoloških procesa.

Samostalnost odjela PTP-a u novom modelu nestaje, a isti se povezuje s nekoliko drugih faza iz lanca vrijednosti. Zajedničku grupaciju unutar sustava čine projektiranje tehnoloških procesa, odabir redoslijeda operacija te planiranje proizvodnje.

Nakon razvoja dizajna proizvoda potrebno je definirati tehnologije i pripadne režime obrade. To je već automatizirano razvojem CAPP sustava, premda je do sada rijetko zapravo primijenjeno u praksi zbog ograničenja pri implementaciji istog. Porastom važnosti personaliziranih proizvoda, varijantni CAPP bi bio koristan i u okviru Industrije 4.0, no s razvojem tehnologije, primjena generativnog CAPP-a bila bi bolja.

Cilj generativnog pristupa je definirati novi plan izrade za svaki pojedini proizvod baziran na informacijama dobivenim iz baze znanja. Istu je bazu moguće koristiti za odabir redoslijeda operacija i planiranje proizvodnje što dovodi do šireg korištenja CAPP sustava u Industriji 4.0. Iz CAD modela potrebno je definirati poseban kod, ali na temelju STEP modela ili sličnog formata zapisa kako bi se mogao koristiti u svim softverima za modeliranje. Softver za generativni CAPP već je razvijen, no Industrija 4.0 zahtjeva njegovu nadogradnju i povezanost s ostalim dijelovima proizvodnog procesa i lanca opskrbe.

CAPP kao takav je dio novog sustava "pametnog pametnog projektiranja tehnoloških procesa (PPTP)" koji uključuje i informacije potrebne za definiranje primarnog procesa, redoslijeda operacija i plana proizvodnje, ali je i povezan sa svim ostalim dijelovima životnog vijeka proizvoda, ali i organizacije unutar tvrtke te sa svim vanjskim poveznicama (slika 22) [91].

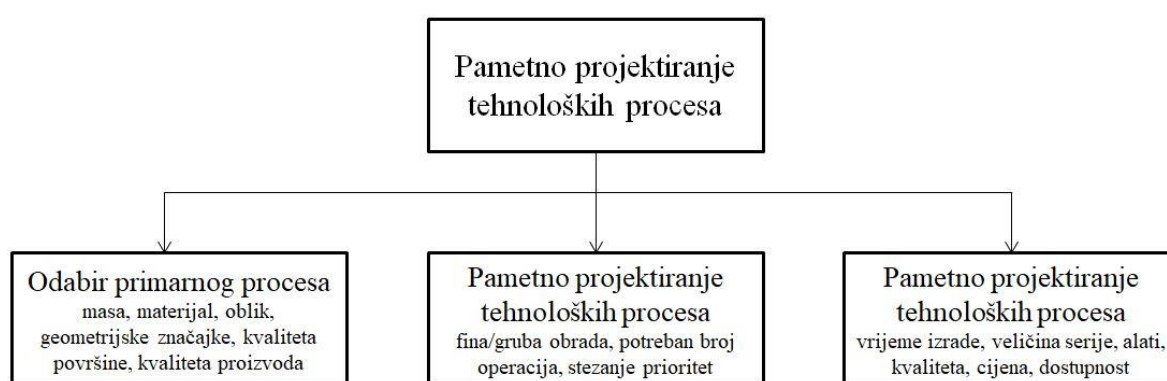


Slika 22 Koncept Pametnog projektiranja tehnoloških procesa (PPTP-a) [91]

Na slici 22 je prikazana struktura PPTP-a, sustava kreiranog u idealnom obliku prema zahtjevima koncepta Industrije 4.0.

U srži PPTP sustava nalazi se CAPP koji generira plan izrade primajući podatke iz postojećih baza i CAD modela. Rad CAPP-a je cijelo vrijeme kontroliran te prolazi kroz testove zadanih ograničenja kako bi se kreirao konačni plan proizvodnje. Radi se o validaciji preko kriterija koji služe kao svojevrsni kontrolni mehanizam. PPTP softver je povezan sa sustavskim (ERP) koji se nalazi u oblaku. To je poveznica faze planiranja proizvodnje i PTP-a, s ostalima u životnom vijeku proizvoda. Glavni sustav prikuplja podatke iz raznih dijelova tvrtke, počevši od dizajna i razvoja proizvoda pa sve do *povratne informacije* korisnika. Prikupljeni podaci šalju se u PPTP softver što postaje informacija koja se pretvara u znanje koje omogućuje optimizaciju tri prethodno opisane zasebne faze u životnom ciklusu proizvoda koje su sada postale jedna.

Kontrolni mehanizmi su od iznimne važnosti, jer njima virtualni sustav postaje svjestan ograničenja fizičkog sustava. Radi se o svojevrsnom digitalnom blizancu u ovoj fazi. Napredni matematički modeli i algoritmi omogućuju prepoznavanje površina i posebnih geometrijskih značajki proizvoda. Kalkulacija pripremno-završnog, pomoćnog i tehnološkog vremena pomoću njih se definira, uz prijedlog potrebnih alata i strojeva uz pripadne režime rada. Kontrolni mehanizam softvera sastoji se od kriterija prikazanih na slici 23 čime se omogućuje povratna informacija sustavu kako je li određena radnja moguće i kako ju optimirati u budućnosti [91].



Slika 23 Struktura PPTP-a [91]

Na slici 23 prikazano je stablo kriterija uključeno u PPTP softver. Prva grupa kriterija kontrolira odabir primarnog procesa. Softver sadrži sva ograničenja fizičkog sustava s prikupljenim podacima i iz ostalih dijelova lanca opskrbe iz organizacijskih razloga.

Glavni kriteriji su masa i materijal. Masa nije povezana samo za mogućnosti obrade već i s logističkim aktivnostima manipulacije obratkom tijekom proizvodnog procesa. Uključuje i ograničenja transportnih vozila za unutarnji ili vanjski transport, ali također ograničenja robota i manipulatora koji su uključeni u transport sirovog materijala, poluproizvoda i proizvoda. Kriterij materijala je vezan većinom za izradu ali također i za kontrolu dostupnosti i cijenu sirovog materijala kojeg je potrebno i moguće nabaviti od raznih dostavljača. Kriterij osnovnog oblika pojednostavljuje arhiviranje i omogućuje usporedbu s prethodnim narudžbama kako bi se mogla provesti kontinuirana optimizacija sa svakom novom primljenom narudžbom. Kriterij geometrijskih značajki kontrolira mogućnosti dostupnih strojeva i alata dok kriterij kvalitete površine ima isti smisao s dodatkom analize troškova i benefita. Kriterij kvalitete proizvoda zbraja efekte i podatke primljene od prethodnih kriterija

te uz povezanost s bazom podataka od povratnih informacija korisnika određuje optimalnu kvalitetu proizvoda i radi analizu troškova.

Druga grupa kriterija vezana je za određivanje redoslijeda operacija. Mnogi kriteriji utječu na redoslijed operacija u proizvodnom procesu, ali softver kontrolira najvažnije. Prvi je kriterij kontrole fine i grube obrade. Eliminacijski čimbenik je činjenica da gruba obrada treba biti izvedena prije fine. To je također i tehničko ograničenje koje zvuči prilično trivijalno, ali kada se redoslijed definira automatski, kontrola ovog segmenta je jako važna. Broj potrebnih operacija je kriterij koji uspoređuje tehnološke procese i redoslijed. Jednaka se tehnologija može koristiti u više različitih operacija tako da ovdje također postoje određena ograničenja i mogućnosti optimizacije. Različiti načini stezanja zahtijevaju manipulaciju između dvije operacije. Optimizacija i kontrola povećava produktivnost, smanjuje pomoćna vremena i troškove. Na kraju definira se redoslijed operacija prema kriterijima važnosti. Određene operacije je potrebno izvesti prije zbog geometrijskih ili organizacijskih zahtjeva što sustav prepoznaje izmjenom informacija između CAPP-a i ERP sustava.

Treća grupa kriterija vezana je za definiranje plana proizvodnje. Osim vremenske komponente, ona uključuje i odabir strojeva što je povezano s kapacitetom proizvodnog sustava. Sustav pušta proizvodu (pametni proizvod) da odluči na kojem će se stroju izvesti određena operacija. Prvi kriterij koji se kontrolira je vrijeme što uključuje pripremno-završno vrijeme, pomoćno i tehnološko vrijeme. Kalkulacijom se dolazi do vremena potrebnog za seriju proizvoda i za cijelu narudžbu, dok je količina još jedan od kriterija. Ovaj se princip omogućuje planiranje proizvodnje u realnom vremenu, s obzirom na trenutnu raspoloživost resursa, što je posebno korisno ako se u proizvodnom pogonu nalazi više strojeva koje mogu provesti istu operaciju. Oni u realnom vremenu daju informaciju o raspoloživosti kako bi se određene količine proizvoda iz serije moglo preusmjeriti na alternativne strojeve. Naprednim algoritmima je moguće izračunati optimalne rute za unutarnji transport kako bi se izrada izvršila s ciljem minimalnog troška ili minimalnog vremena, ovisno o situaciji.

Zahtjevi na PPTP softver su visoki, budući da se radi o poveznici s ERP sustavom i CAPP-om, trebao bi prepoznati i analizirati različite vrste podatke u realnom vremenu kako bi se dobili dobri rezultati za optimalnu izvedbu proizvodnje. U grubo rečeno, on uspoređuje podatke s ograničenjima kriterija, ali njegov je zadatak i generirati važnost kriterija u raznim situacijama. Kako bi se ovaj softver proveo u praksi potrebno je uskladiti rad dviju metoda koje će biti implementirane. Prva je prediktivna analiza rudarenjem podataka. Preko podataka je moguće prepoznati uzorke ponašanja sustava i predvidjeti buduće potrebe. Druga su sustavi

za potporu odlučivanju s kojima se dodjeljuju važnosti pojedinim kriterijima kako bi se došlo do optimalnog konačnog zaključka (odluke). U praktičnoj izvedbi novog softvera, rudarenjem podataka se procesira velika količina podataka dok se sustavi za potporu odlučivanju koristi za definiranje važnosti kriterija s prediktivnom analizom kojom se dolazi do zaključka u kojim uvjetima će određeni kriteriji dobiti određenu važnosti [91].

4.4.2.1. *Mogućnosti implementacije*

Digitalno okruženje zahtjeva drastične promjene i potpuno novi način projektiranja tehnoloških procesa. Prije implementacije novog sustava, potrebno je izračunati čimbenik spremnosti. Tvrtke koje nisu spremne za Industriju 4.0 zahtijevaju radikalne promjene koje prate visoka investicijska ulaganja. Implementaciju nije moguće provesti preko noći, stoga su tvrtke koje su tek na početku razvoja, na neki način, u prednosti pred ostalima. Tada je PPTP sustav moguće definirati na početku, i za specifične situacije i potrebe buduće tvrtke. Generalni sustav, univerzalno primjenjiv je moguće definirati, ali bi se trebala omogućiti fleksibilnost, odnosno mogućnost prilagodbe pojedinačnim potrebama. Sigurnost sustava je također potrebno oprezno riješiti, budući da je ovo jedan od univerzalnih izazova koje su postavili digitalni sustavi.. Također, znanje unutar sustava trebalo bi biti intelektualno vlasništvo tvrtke, jer, bez obzira na jednak generalni pristup, optimizacijski algoritmi i kontrolni mehanizmi zahtijevaju inovativnost kako bi se postigla konkurencijska prednost.

5. SUSTAVI ZA VIŠEKRITERIJSKO ODLUČIVANJE I OPTIMIRANJE

DSS (eng. *Decision Support System*) naziv je za računalne programe koji se koriste kao pomoć pri odlučivanju na bilo kojoj razini upravljanja; s naglaskom na odlučivanju kod slabo strukturiranih i nestrukturiranih zadataka. DSS je računalni sustav za organizaciju informacija, identifikaciju i dohvat informacija, analizu i transformaciju informacija, izbor modela odlučivanja i analizu dobivenih rezultata. Usmjeren je rješavanju dobro strukturiranih i slabo strukturiranih problema, na sadašnje i buduće odluke, na kontrolu i planiranje. Mora omogućavati fleksibilnost i odlučivanju i implementaciji odluka. Odluke u kojima će se koristiti mogu biti jednostavne i vrlo složene.

5.1. Povijest DSS-a [92]

Sustavi za potporu odlučivanju prisutni su već dugi niz godina. Razvoj DSS-a počeo je krajem šezdesetih godina prošlog stoljeća, a implementacija se dogodila sredinom osamdesetih godina. Prvotne implementacije završavaju sredinom devedesetih, implementacijom internetske aplikacije DSS-a.

Sustavi su se mogli razvijati usporedno s razvojem računalnih sustava i opreme. Prve ideje datiraju iz 1965. godine od kada postoje prvi zapisi o idejama, ljudima, sustavima i tehnologijama vezanim za ove sustave.

Razvoj DSS-a vodio je k razvoju načina poslovanja i organizacije proizvodnje. Sustavi su se razvijali kako bi omogućili i olakšali samostalno donošenje što objektivnijih odluka, dinamičniji rad u timovima te bolju organizaciju hijerarhije tvrtke zbog sustava koji pomaže kod donošenju vrlo važnih i što je moguće racionalnijih odluka.

Bez adekvatne postojeće tehnologije, bilo je teško i skupo izgraditi velike informacijske sustave. U to je vrijeme IBM razvio sustav „360“ i omogućio praktičniji i jeftiniji razvoj menadžerskih informacijskih sustava (eng. *Management Information Systems – MIS*) u velikim tvrtkama. Sustav je omogućio menadžmentu strukturirane i periodične izvještaje. Također, bile su dostupne mnoge informacije iz računovodskih i financijskih sustava.

U kasnim šezdesetima počeo je razvoj DSS sustava zasnovanog na modelu jer je u tom periodu to bilo puno praktičnije. Bio je poznat kao *Menadžerski sustav odlučivanja*.

Dva pionira DSS-a, Peter Keen i Charles Stabell, tvrde da se koncept sustava za donošenje odluka razvio iz teoretskih razmatranja na *Cairnegie* institutu za tehnologiju i tehničkog rada

na interaktivnim kompjutorskim sustavima, ponajviše provedenih na MIT-u šezdesetih godina.

Sedamdesetih su se pojavili prvi članci na temu DSS-a, strateškog planiranja sistema i potpore donošenju odluka. 1966. i 1967. Scott Morton istraživao je kako bi kompjuterski i analitički modeli mogli pomoći menadžerima pri donošenju ključnih odluka. Odradio je eksperiment u kojem su menadžeri koristili MDS (eng. *Management Decision System*). Marketinški i proizvodni menadžeri koristili su MDS kako bi koordinirali planirane proizvodnje opreme za pranje rublja. Istraživanje je provedeno na tadašnjoj dostupnoj opremi te je to prvo istraživanje koje je implementiralo, definiralo i testiralo DSS zasnovan na modelu.

Sedamdesetih godina provedeno je istraživanje korištenja DSS-a kod donošenja svakodnevnih investicijskih odluka kako bi menadžment podebljao svoj portfelj.

1974. godine Gordon Davis, profesor sa Sveučilišta u Minnesoti, objavio je važan članak o MIS-u. Definirao je MIS kao „integrirani, čovjek/stroj sustav koji osigurava informacije za potporu operacijama, menadžmentu i odlukama pri donošenju odluka u svim funkcijama u organizaciji“. Taj je članak bila prekretnica za utjelovljenje istraživanje DSS-a i primjenu u praksi.

Sljedećih se godina o DSS-u raspravljalo na raznim konferencijama, od kojih je prva održana 1981. u Atlanti, na kojoj su stručnjaci s MIT-a, Keen i Scott Morton, postavili temelje analize, dizajna, implementacije, evaluacije i razvoja DSS-a.

Knjiga Ralphe Spraguea i Erica Carlsona iz 1982. Godine, *Building Effective Decision Support Systems*, bila je vrlo važna jer je objasnila DSS baze podataka i DSS zasnovan na modelu. Knjiga je dala jednostavan i razumljiv uvid u to kako bi organizacije trebale koristiti i izgraditi DSS.

Do kraja sedamdesetih DSS je mogao biti potpora operacijama, financijskom menadžmentu i strateškom donošenju odluka. DSS je mogao koristiti podatke iz sistema kao *Geodata Analysis* i *Display System*, strukturirane multidimenzionalne podatke i nestrukturirane dokumente. Mnogi su modeli koristili optimizaciju i simulaciju. Također, statistički su paketi prepoznati kao temelj za izgradnju DSS-a.

Kod financijskog planiranja sustava, ovi su alati postali jako popularni. Ideja je bila kreirati univerzalni jezik koji bi stručnim osobama omogućio gradnju modela bez napora. Popularni sistem za planiranje IFPS (eng. *Interactive Financial Planning System*) koristio se do sredine devedesetih godina. Po uzoru na njegov način rada, sredinom osamdesetih razvijen je DSS zasnovan na modelu.

Početkom osamdesetih, znanstvenici su razvili novu kategoriju DSS-a. Bio je to DSS zasnovan na podacima. Krajem osamdesetih predstavljen je koncept i metode kojima se donošenje odluka omogućuje korištenjem potpornih sustava baziranih na činjenicama. Ponekad su to knjige, izvještaji ili informacijski sustavi.

Devedesetih se godina pojavio DSS koji je koristio *Oracle* ili *DB2*. DSS zasnovan na modelu bio je u domeni operacijskih istraživanja i nije bio dio informacijskih sustava.

Tada je došlo do promjene i prelaska na DSS zasnovan na komunikacijama. 1994. mnoge su tvrtke počele s nadogradnjom mrežne infrastrukture, a sve je to zbog razvoja Interneta. DSS zasnovan na *webu* počeo se razvijati 1995. godine. S razvojem Interneta, razvoj DSS-a je također počeo rasti i njegova se primjena počela puno brže širiti.

5.2. Vrste DSS-a

Postoji nekoliko vrsta DSS-a. Razlikuju se s obzirom na stupanj razvoja, vrijeme u kojem su nastale i jednostavnost primjene.

DSS se dijeli na [93]:

- DSS zasnovan na modelu,
- DSS zasnovan na dokumentima,
- DSS zasnovan na znanju,
- DSS zasnovan na podacima,
- DSS zasnovan na komunikacijama,
- DSS zasnovan na webu.

5.2.1. DSS zasnovan na modelu

DSS zasnovan na modelu naglašava pristup i manipulaciju modelom, na primjer statističkim, financijskim, optimizacijskim ili simulacijskim. Jednostavni statistički i analitički alati osiguravaju elementarni nivo funkcionalnosti. Neki OLAP (eng. *Online Analytical Processing*) sustavi koji dopuštaju kompleksnu analizu podataka mogu se klasificirati kao hibridni DSS sustavi koji osiguravaju modeliranje, vađenje podataka i sumiranje funkcionalnosti podataka. DSS koriste kompleksne financijske, simulacijske, optimizacijske i višekriterijalne modele kako bi omogućili potporu kod donošenja odluka. Koriste podatke i parametre koje su osigurali donositelji odluke kako bi pomogli budućim sudionicima u tim situacijama pri analizi situacije [92].

5.2.2. DSS zasnovan na dokumentima

DSS zasnovan na dokumentima usmjeren je preuzimanju i upravljanju nestrukturiranih dokumenata. Dokumenti se mogu pojaviti u mnogim oblicima, no tri su najčešće kategorije: *oralni, pisani i vizualni*. Primjeri oralnih dokumenata su transkribirane konverzacije, vizualni su dokumenti, reportaže s vijestima ili televizijske reklame dok u pisane dokumente spadaju pisani izvještaji, katalozi, pisma potrošača ili e-mailovi.

To je računalom podržan sustav koji integrira mnoge kapacitete i tehnologije obrade kako bi se podaci lako izvadili i analizirali pri donošenju odluke. *Web* omogućava pristup velikim bazama podataka koje se sastoje od dokumenata u obliku hiperteksta, slika, zvukova i video zapisa. Tražilice su snažna i izrazito korisna pomoć u DSS-u zasnovanom na dokumentima [92].

5.2.3. DSS zasnovan na znanju

DSS zasnovan na znanju može predložiti ili preporučiti pothvate menadžerima u donošenju odluka pri rješavanju problema. Ekspertiza se sastoji od znanja o određenoj domeni, razumijevanja problema unutar te domene i sposobnost rješavanja nekih od problema. Slični je koncept rudarenja podataka (eng. *Data mining*). Odnosi se na klasu analitičkih aplikacija koje traže skrivene uzorke u bazi podataka. Rudarenje podacima je proces pretraživanja velike baze podataka kako bi se ostvarile poveznice između podataka. Alati koji se koriste za DSS zasnovan na znanju ponekad se nazivaju *Inteligentna potpora odlučivanju* (eng. *Intelligent Decision Support Methods*). Alati za rudarenje podacima mogu se koristiti kako bi se stvorio hibridni DSS koji sadrži glavne komponente podataka i znanja.

Ovi sustavi koriste znanje pohranjeno u obliku pravila, okvira i informacija. Ljudi stupaju u interakciju s programom kada žele riješiti neki problem. Sustav se bazira na preporukama baziranih na ljudskom znanju i pomažu rješavanju limitiranog broja slučajeva.

DSS zasnovan na znanju razlikuje se od DSS-a zasnovanog na modelu u načinu na koji je znanje prezentirano i kako se obrađuje. Razlika postoji jer većina ekspertnih sustava pokušava simulirati razumne ljudske procese.

Može dati prijedloge ili preporuke bazirane na određenim kriterijima. Takvi sustavi zahtijevaju interakciju između čovjeka i računala. Napredni analitički alati kao što je rudarenje podacima mogu se integrirati s ovim DSS-om kako bi se lakše pronašli skriveni uzorci. Postoji mogućnost samoučenja, identifikacije povezanosti između podataka i ako je potrebno, izvođenja heurističkih operacija. Ove mogućnosti pretvaraju ga u inteligentni

sustav, povećan je kapacitet rješavanja problema i povećana je sigurnost prijedloga. Važno je spomenuti kako predstavljanje znanja ovdje igra glavnu ulogu. Dobro definirano znanje uključuje sustave bazirane na pravilima, semantičkim *web* i okvirnim sustavima. Sustav baziran na pravilima sadrži pravila u bazi podataka [92].

5.2.4. DSS zasnovan na podacima

Većina DSS-a zasnovanog na podacima predviđeni su za menadžere, osoblje i dobavljače proizvoda ili usluga. Koristi se za ispitivanje baze podataka ili skladišta podataka u traženju određenih odgovora za određene svrhe. Angažiran je preko glavnog „okvirnog sustava“ (eng. *main frame system*), poveznice klijent/server ili preko *weba*.

DSS zasnovan na podacima je najčešći DSS. Osigurava operacijsku i stratešku poslovnu inteligenciju koja koristi interne, a ponekad i eksterne, podatke tvrtke. Ključ uspješnog DSS-a zasnovanog na podacima je u lakom i brzom pristupu velikom broju pouzdanih, dobro organiziranih i višedimenzijskih podataka. Omogućuje *ad hoc* filtriranje i vađenje podataka. Sustav korisnicima omogućuje sistematsko pretraživanje i vađenje podataka pohranjenih u računalu, što se često provodi korištenjem padajućeg menija, upitnici su obično predefimirani i korisnici imaju *drill-down* mogućnosti. Korisnici mogu često promijeniti razine agregacije, od općeg do detaljnog (eng. *drill-down*). Korisnicima je omogućeno korištenje različitih vrsta prikaza podataka kao što su *scatter* dijagrami, *bar* i *pie* dijagrami koje interaktivno mogu mijenjati. Također, omogućen je proračun deskriptivnom statistikom kako bi se sumirali opisani podaci, kreirale linije trenda kretanja podataka i međusobno povezali podaci [92].

5.2.5. DSS zasnovan na komunikacijama

DSS zasnovan na komunikacijama uključuje računalne, kolaboracijske i komunikacijske tehnologije za podršku grupi u njenim zadacima. On može, ali i ne mora uključivati i donošenje odluka. Zapravo svaki DSS koji uključuje podršku grupnom radu spada u ovu kategoriju [92].

5.2.6. DSS zasnovan na internetskoj aplikaciji

U skladu s trendovima i potrebama korisnika, istraživanja DSS-a su se tijekom vremena usmjerila u četiri smjera:

- prema inteligentnim računalnim sustavima,
- prema aplikacijama modela,
- prema modelu rješavanja problema,
- prema korisničkom sučelju.

Primarni DSS sadržavao je *ad hoc* upite, alate za izvještavanje, optimizacijske i simulacijske modele, OLAP, pretraživanje podataka i njihovu vizualizaciju. Danas su DSS aplikacije proširene na kolaborativni DSS, pregovarački DSS, DSS baziran na znanju i DSS baziran na *webu*.

Web se danas sve više koristi kao klijent/server platforma u mnogim poslovnim organizacijama zbog niskih troškova softvera, instalacije i održavanja. Time i rješenja bazirana na *webu* imaju olakšan pristup, analizu i distribuciju informacija iz baze podataka organizacije, putem OLAP-a. OLAP je tehnologija koja omogućava manipulaciju podacima organizacije kroz više dimenzija kao što su proizvod, vrijeme, mjesto itd. Internet i intranet su tijekom prethodnih godina pružili široku mogućnosti izgradnje DSS-a koji se može nositi s problemima globalne prirode. HTML 2.0 u obliku tagova i tabela je prekretnica u razvoju DSS-a baziranih na *webu*

DSS baziran na *webu* je sustav koji komunicira informacijama ili alatima za podršku odlučivanju kroz *web* okruženje (internet, ekstranet i intranet) koristeći *web* tehnologije. Na ovaj način donošenje odluka je efikasnije, jer se smanjuju troškovi implementacije modela, a i razmjena informacija je bolja. Power D.J. definirao je DSS baziran na *webu* kao „*kompjuterizirani sustav koji pruža informacije za podršku odlučivanju ili alate za podršku odlučivanju menadžerima ili poslovnim analitičarima pomoću web pretraživača kao što su Netscape Navigator ili Internet Explorer*“. Računalni server, koji je *host* DSS aplikaciji, povezan je na računalo korisnika pomoću mreže s TCP/IP protokolom.

Prednost DSS-a baziranog na *webu* nad klasičnim DSS-om je korištenje *weba* koje olakšava unos podataka i postupak analize, poboljšava način donošenja odluka i smanjuje troškove razvoja. Ključna prednost je također olakšan pristup sustavu i isplativije dobivanje relevantnih informacija [92].

5.3. Višekriterijski pristup

Ideja za korištenje višekriterijskog pristupa pri izračunu čimbenika spremnosti došla je iz činjenice da je većina metoda do sada predstavljena u literature poprilično gruba te ne daje dovoljno detaljan uvid u trenutno stanje niti uključuje sve na utjecajne kriterije.

Utjecajni kriteriji opisuju različite karakteristike tvrtke, a opis može biti definiran na kvalitativan ili kvantitativan način. Uz pomoć matematičkih algoritama i procedura, višekriterijalni pristup omogućuje precizniji izračun čimbenika spremnosti [93]. Različite su metode izračuna čimbenika spremnosti već implementirane u posebnim softverskim

rješenjima, koji omogućuju strukturiranje modela, ponderiranje, validaciju te simulaciju različitih slučajeva.

Zato će se u sljedećem poglavlju razmotriti karakteristike, prednosti i nedostaci nekoliko različitih višekriterijskih optimizacijskih metoda, kako bi se odabrala najpogodnija za izračun čimbenika spremnosti. Metode koje će biti razmotrene su TOPSIS, AHP i ELECTRE.

5.3.1. Višekriterijska metoda odlučivanja *TOPSIS*

TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) metoda je višekriterijske potpore pri odlučivanju čiji cilj (odabrana alternativa) ima najkraću udaljenost od pozitivnog idealnog i najdalju od negativnog idealnog rješenja. Rangiranje alternativa bazira se na relativnoj sličnosti s rješenjem. Najbolje i najlošije rješenje interpretira se za svaki kriterij zasebno, bilo da je potrebna maksimizacija ili minimalizacija.

Prvi korak *TOPSIS* metode je izračun normaliziranih rangova kriterija. Sljedeći je definicija pozitivnog idealnog i negativnog idealnog rješenja. Finalni rang definira euklidska udaljenost svake alternative [94].

5.3.2. Višekriterijska metoda odlučivanja *ELECTRE*

ELimination Et Choice Translating REality (ELECTRE) je skupina metoda baziranih na prirodnoj definiciji problema čiji je cilj pronaći rješenje ili rangirati alternative. Za razliku od uobičajenih evaluacija kriterija, ovdje je moguće implementirati preferencijalne informacije kao težine, indeks usklađenosti, indeks neusklađenosti i efekt veta. Iz metode *ELECTRE I* razvijene su *ELECTRE II, III, IV, IS i TRI*. Baza svake *ELECTRE* metode je konstrukcija jednog ili nekoliko međuodnosa, postupak eksploatacije koja objašnjava preporuke. Koristi se za odbacivanje neprihvatljivih alternativa u problemu.

Kriteriji u *ELECTRE* metodi imaju dva seta parametara – koeficijente važnosti i veto granice. Alternative se rangiraju zasebno za svaki pojedini kriterij. *ELECTRE III i IV* su prikladnije za evaluaciju stvarnih problema te uključuju neizrazitu logiku.

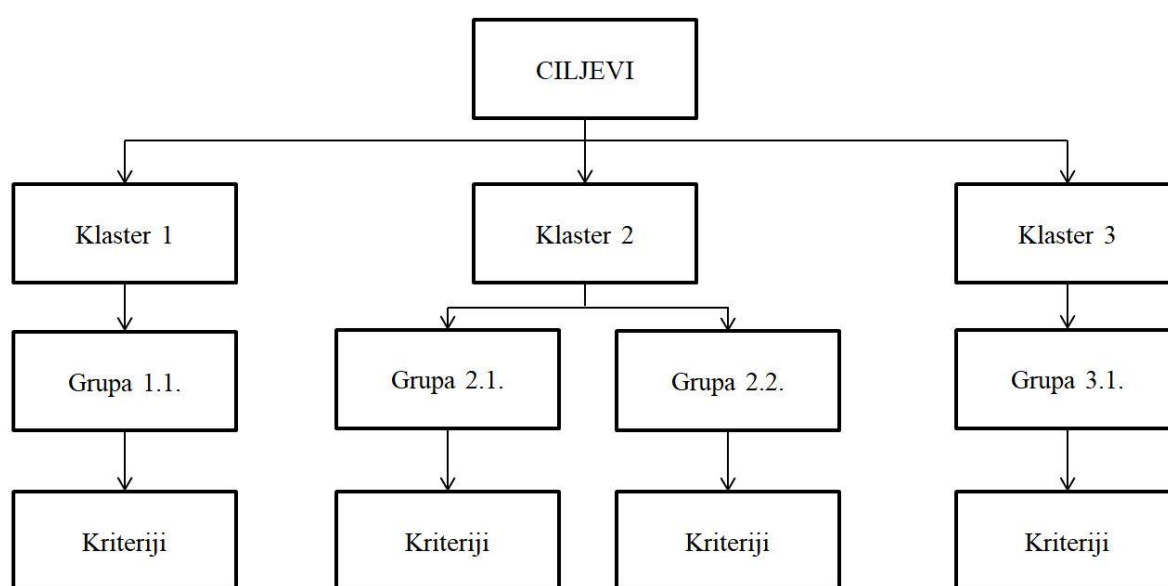
ELECTRE nije široko primijenjen do sada u industriji, nije jednostavan i ne postoji komercijalni softver za široko korištenje iste. Matematičku je proceduru tako potrebno programirati i kalkulirati u softveru kao što je Matlab, što znači da nije moguće jednostavno provesti analizu osjetljivosti te definirati promjene u modelu [95].

5.3.3. Višekriterijska metoda odlučivanja *PROMETHEE*

U *PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations)* metodi, korisnik izražava preferencije za svaki kriterij koristeći šest predefinirane funkcije

koje označavaju različite situacije [96]. Razvijena je 1983., a ulazni podaci sastoje se od matrice sa setom potencijalnih alternativa. Kako se razvijala, nastala je mogućnost napredne analize osjetljivosti u deskriptivnoj komponenti PROMETHEE rangiranja, grafičkoj reprezentaciji višekriterijskog problema. Implementirana je u softver Visual Promethee koji je već korišten i ispitan u industrijskom okruženju [97].

Evaluacija parametara strukturiranih u klastere i grupe u ovoj metodi zahtjeva visoki kognitivni napor korisnika. Rezultati evaluacije su rangovi. Hijerarhija kriterija rangira se prema grupama, a svaki je kriterij rangiran i uspoređen prema alternativama. Hijerarhija je ograničena na tri razine (slika 24).



Slika 24 Hijerarhijska struktura PROMETHEE metode [98]

Na najvišoj razini su klasteri, sljedećoj grupe kriterija i na najnižoj individualni kriteriji. Preferencije među kriterijima u Visual Promethee softveru rade se u „Preference Function Assistant“ modulu. Težina kriterija pozitivan je broj koji predstavlja relativnu važnost kriterija dok se težine mogu alocirati scenarijima koji predstavljaju različite razine odlučivanja kod grupnih problema. Metoda omogućuje definiranje ograničenja kriterija.

5.4. Analitički hijerarhijski proces (AHP metoda)

Jedna od najkorištenijih i najpopularnijih višekriterijskih metoda za odlučivanje i optimiranje je AHP metoda (*Analitički Hijerarhijski Proces*) koja omogućuje odabir najznačajnijeg kriterija i alternative [99].

5.4.1. Postupak

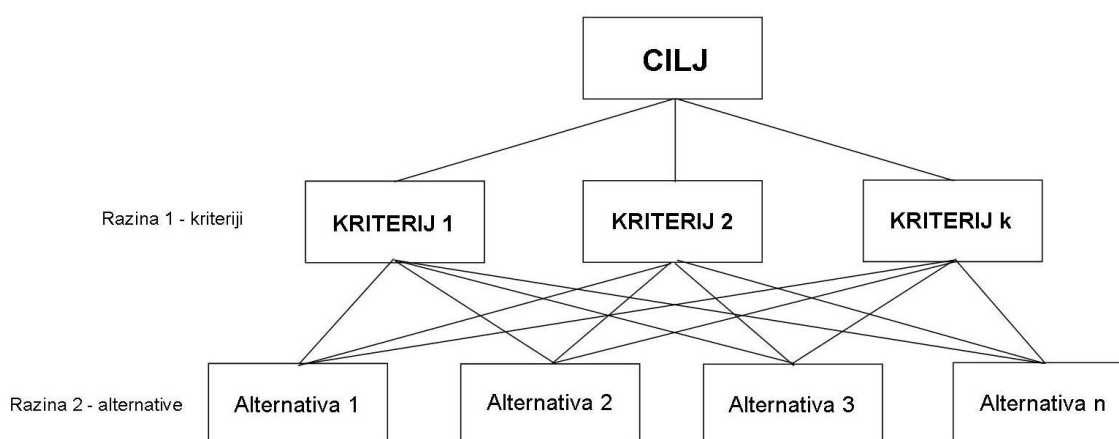
AHP metoda sastoji se od sljedećih faza [99]:

1. strukturiranje problema,
2. određivanje najznačajnijeg kriterija,
3. određivanje najznačajnije alternative,
4. određivanje konačnog rješenja (cilja).

5.4.1.1. Strukturiranje problema

AHP metoda strukturira problem na sljedeće razine (slika 25):

1. razinu cilja,
2. razinu kriterija,
3. razinu potkriterija,
4. razinu alternativa.



Slika 25 Strukturiranje problema AHP metode [98]

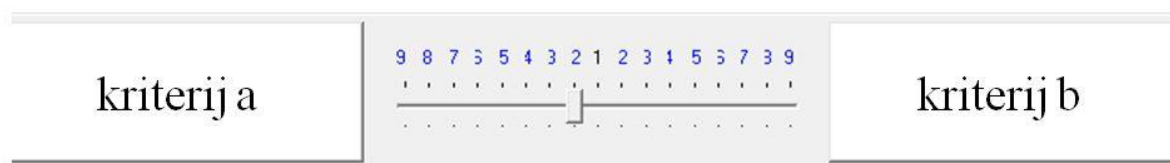
Na slici 14 prikazana je struktura problema u AHP metodi na vrhu koje je cilj do kojeg se metodom želi doći. Na sljedećoj razini su kriteriji i potkriteriji dok se na zadnjoj razini nalaze alternative. Sve su razine međusobno povezane.

5.4.2. Saatyjeva skala

Na početku se odabire cilj, a zatim je potrebno postaviti odgovarajuće kriterije. Kriterija može biti mnogo te je potrebno obuhvatiti što širi spektar kriterija kako bi odluka bila optimalna. Slijedi uspoređivanje i ocjenjivanje kriterija u parovima. Ukupan broj potrebnih usporedbi pomoću Saatyjeve skale dan je izrazom (1).

$$n * \frac{n-1}{2} \quad (1)$$

Saatyjeva skala (slika 15) je prilagođena ljudskoj prirodi odlučivanja i prosuđivanja važnosti.



Slika 26 Saatyjeva skala relativne važnosti [100]

Na slici 26 prikazano je da se Saatyjeva skala sastoji od brojčane skale od jedan do devet, za svaki kriterij/alternativu (u ovom slučaju alternative dva modela automobila) pri čemu jedan označava malu važnost dok devet označava ekstremno veliku važnost, uz dodane međuvrijednosti (slika 27).

Intenzitet važnosti	Definicija	Objašnjenje
1	Jednako važno	Dvije aktivnosti jednako doprinose cilju.
3	Umjereno važnije	Na temelju iskustva i procjena, daje se umjerena prednost jednoj aktivnosti u odnosu na drugu.
5	Strogo važnije	Na temelju iskustva i procjena, strogo se favorizira jedna aktivnost u odnosu na drugu.
7	Vrlo stroga, dokazana važnost	Jedna aktivnost izrazito se favorizira u odnosu na drugu, njezina dominacija dokazuje se u praksi.
9	Ekstremna važnost	Dokazi na temelju kojih se favorizira jedna aktivnost u odnosu na drugu, potvrđeni su s najvećom uvjerljivošću.
2,4,6,8	Međuvrijednosti	
1.1 – 1.9	Decimalne vrijednosti	Pri usporedbi aktivnosti koje su po važnosti blizu jedna drugoj, potrebne su decimalne vrijednosti kako bi se preciznije izrazila razlika u njihovoj važnosti.

Slika 27 Saatyjeva skala – značenje pojedinih vrijednosti [98]

Iz slike 27 vidljiva je raspodjela i opis važnosti koje se dodjeljuju kriterijima, odnosno alternativama.

AHP metoda zasniva se na četiri aksioma [99]:

1. Aksiom recipročnosti. Ako je element A n puta značajniji od elementa B, tada je element B $1/n$ puta značajniji od elementa A.
2. Aksiom homogenosti. Usporedba ima smisla jedino ako su elementi usporedivi - npr. ne može se uspoređivati težina komarca i težina slona.
3. Aksiom zavisnosti. Dozvoljava se usporedba među grupom elemenata jednog nivoa u odnosu na element višeg nivoa, tj. usporedbe na nižem nivou zavise od elementa višeg nivoa.
4. Aksiom očekivanja. Svaka promjena u strukturi hijerarhije zahtjeva ponovno računanje prioriteta u novoj hijerarhiji.

5.4.3. Određivanje najznačajnijeg kriterija i alternativa

Kriteriji mogu biti kvalitativni i kvantitativni. Važnost kvalitativnih kriterija se prosuđuje samostalno i subjektivno, jer nije moguće u potpunosti točno i objektivno prosuditi o važnosti jednog kvalitativnog kriterija naspram drugom. Moguće je znati okvirno (što je u nekim slučajevima dovoljno pouzdano) koliko je jedan kriterij važniji od drugog i sukladno tome samostalno procijeniti njegovu važnost. Kod kvantitativnih kriterija ona je egzaktno poznata. Jednako je i s alternativama.

5.5. Prednosti i nedostaci AHP metode

AHP metoda iskazala se kao jedna od metoda odlučivanja s najboljim uporabnim karakteristikama. Njome je razrađen cijeli proces donošenja odluke, od početka (definiranja cilja, kriterija i alternativa) do kraja (odluke).

5.5.1. Prednosti

AHP metoda ima niz prednosti kod odlučivanja [98]:

- Metoda je izuzetno prilagođena korisniku kojem je omogućeno njeno jednostavno korištenje. Osim procjenjivanja važnosti različitih kriterija, moguća je usporedba različitih alternativa te provedba simulacija koja prikazuje promjene u izlaznim podacima izmjenom ulaznih podataka.
- Metoda je dokazana u praksi i primjenjuje se već dugi niz godina.
- Omogućena provjera konzistentnosti korisnika.
- AHP metoda omogućava usporedbu kvalitativnih i kvantitativnih kriterija pomoću apsolutne skale za mjerenje i na kraju procjenjivanje te uspoređivanje njihovih važnosti.
- Kriteriji i alternative uspoređuju u parovima, što smanjuje mogućnost pogreške.

- Olakšan i ubrzan proces donošenja odluke, zbog čega se korisnik osjeća puno bolje.
- Stvoreni su uvjeti za timski rad. Tim je u mogućnosti dogovoriti se oko prioriteta i ocjena raznih kriterija te svatko može unijeti svoju varijantu i obrazložiti svoje rezultate.
- Postoje programi koji su vrlo razvijeni i jednostavni za korištenje te omogućuju brzo i jednostavno donošenje odluke (kao npr. *Expert Choice*).
- Ušteda vremena i smanjenje troškova.

5.5.2. Nedostaci

Prednosti AHP metode u nekim slučajevima postaju i nedostaci [98].

- Čovjek je taj koji donosi odluku o važnosti jednog kriterija ili alternative nasuprot drugoj. Teško je da točno i precizno „odvagnuti“ njenu prevlast ili podčinjenost. Na bodovnoj je skali od jedan do devet teško odabrati točan broj, odnosno, je li kriterij (alternativa) A pet ili četiri puta važnija od kriterija (alternative) B. Jedno od ponuđenih rješenja dao je Hajkowicz (2000.) koji je u svojoj studiji koristio dvobodovnu ljestvicu što je olakšalo i skratilo cjelokupan proces donošenja odluke, što znači da su korisnici morali prosuditi je li kriterij (alternativa) više, manje ili jednako važan kao i drugi kriterij (alternativa).
- Kod kompleksnih zadataka postoji veliki broj kriterija i potkriterija pa struktura problema postaje sve kompleksnija, a broj parnih usporedba jako velik što produljuje i otežava proces donošenja odluke.

5.6. Diskusija – odabir metode

Karakteristike svake pojedine metode dane su u tablici 3.

Tablica 3 Usporedba višekriterijalnih metoda za potporu odlučivanju

	TOPSIS	PROMETHEE	AHP	ELECTRE
REZULTAT/CILJ	Najkraća geometrijska udaljenost od pozitivnog idealnog rješenja i najduža geometrijska udaljenost od negativnog idealnog rješenja.	Odabir najbolje alternative za svaki pojedini cilj, odnosno omogućuje razumijevanje problema, što je u ovoj metodi veći prioritet od odabira jednog konačnog rješenja.	Najbolje rješenje s obzirom na zadane kriterije i težine kriterija, omogućuje i detaljniju razradu i razumijevanje problema.	Koristi se kako bi se eliminirale alternative koje ne odgovaraju zadanim značajkama.
METODOLOGIJA	Svakom se kriteriju zasebno daje težina.	Baziran na matematici i sociologiji.	Baziran na matematici i psihologiji.	Odabir, rangiranje i sortiranje.
SPECIFIČNOSTI	Normaliziran rezultat, neograničen broj	Osigurava opsežan i racionalni okvir za strukturiranje	Primjena u grupnom donošenju odluka.	Ograničen set alternativa.

	TOPSIS	PROMETHEE	AHP	ELECTRE
	kriterija i alternativa.	problema odlučivanja.		
IZAZOVI	Ne postoji mogućnost usporedbe u paru, kao niti detaljna evaluacija međusobnog odnosa kriterija i alternativa.	Problemi s velikim utjecajem ljudske percepcije i procjene – utjecaj subjektivnosti.	Minimizirana subjektivnost.	Analiza osjetljivosti, mogućnost usporedbe alternativa.
PREDNOSTI	Jednostavnost, geometrijska udaljenost kao vrijednost težine alternativa.	Koristan u situacijama kada je teško kvantificirati utjecajne elemente na odluku.	Mogućnost kvantifikacije; strukturiranja i analize kompleksnih odluka.	Kriteriji se mogu definirati uz pomoć dvije karakteristike – koeficijentom važnosti i ograničenjima.
DOSTUPNI SOFTVER	Sanna, Scikit-Criteria (Python), decision-radar.com	Visual Promethee	Expert Choice	Matlab, Excel – ugradbeni moduli; decision-radar.com

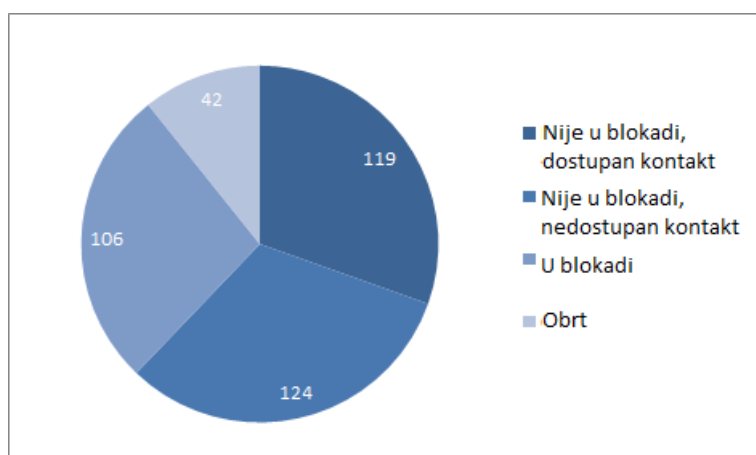
Prema istraženim karakteristikama i dosad objavljenih radova literaturi, odlučeno je da će se za proračun čimbenika spremnosti koristiti AHP metoda. Glavni razlog je povoljan omjer širokih mogućnosti i jednostavnosti korištenja. Daje popriličnu slobodu u strukturiranju problema, odnosno hijerarhiji kriterija te mogućnost istovremeno usporedbe u paru i evaluacije kvantitativnih rezultata. Moguća je i opcija timskog rada, jednostavna provedba „što ako“ (eng. *what-if*) analize te je sve implementirano u *Expert Choice* softver [100].

Također, AHP metoda daje mogućnost različitih modeliranja oblika ciljeva te grafički prikaz rezultata. Iz tog će se razloga ova metoda u daljnjim fazama rada koristiti kao osnova modela za izračun čimbenika spremnosti. Ona omogućuje unošenje velikog broja kriterija i definiciju njihovog utjecaja na alternative, zbog čega je njena struktura i kompleksnost optimalan odabir za navedenu problematiku.

6. PRELIMINARNO ISTRAŽIVANJE

Cilj preliminarnog istraživanja bio je dobiti uvid u trenutno poznavanje, mišljenje i dosege u implementaciji elemenata Industrije 4.0 u hrvatskim malim i srednjim tvrtkama. Budući da je isto usmjereno na projektiranje tehnoloških procesa, ciljana skupina bila su male i srednje tvrtke koja sadrže odjel tehnološke pripreme, odnosno projektiranja tehnoloških procesa (PTP). Stoga su odabrane tvrtke koja se bave strojnom obradom.

Popis tvrtki dobiven je iz Hrvatske gospodarske komore, online registra „Digitalna komora“ [102]. Odabrana šifra djelatnosti (NKD) jest C2562 – „Strojna obrada metala“ u kojem je navedeno 290 gospodarskih subjekata. Od toga su izdvojena tvrtke koje nisu u blokadi ili likvidaciji, te mikro, male i srednje tvrtke. Uzorak je proširen na općenito pretraživanje subjekata pomoću internetskih tražilica pod pojmovima „CNC obrada“ ili „Strojna obrada metala“, budući da mnogi od njih koji se bave obradom metala nisu formalno u Hrvatskoj registrirana pod ovom šifrom djelatnosti. Isto tako, mnogi obrti bave se traženom djelatnošću, a s obzirom na njihovu strukturu i broj zaposlenih, oni su također uzeti u obzir te u kasnijim fazama istraživanja poistovjeđeni s mikro tvrtkama.



Slika 28 Ciljana skupina preliminarnog istraživanja 1

Na slici 28 prikazana je raspodjela ukupne ciljane grupe. Razmatrano je ukupno 391 poslovni subjekt, no od istih je 106 u blokadi, stoga su isti izuzeti iz istraživanja. 124 nije u blokadi, ali ne postoji dostupan kontakt dok za 119 malih, srednjih i mikro tvrtki i 42 obrta je pronađen kontakt i oni su postali dio ciljane grupe istraživanja kojima je poslana anketa.

Mnoštvo poslovnih subjekata nema javno dostupan kontakt na internetu, bilo da se radi o službenoj web stranici, registru Hrvatske gospodarske komore ili ostalim dostupnim registrima poslovnih subjekata, zbog čega je dio isključen iz istraživanja.

Istraživanje je provedeno anketom koja je poslana direktnim e-mailom, kako bi se izbjegla mogućnost neprimanja istog zbog slanja masovnih poruka, i to na 161 adresu, odnosno 161 tvrtka koja se bave strojnom obradom (većinom metala). Anketa je napravljena online, pomoću Googleovog alata Obrasci, te je primljeno ukupno 37 odgovora, što je 22,98% od ukupnog broja poslanih upita. Budući da je odgovora više od 30, kao minimalna granica za kvalitetnu provedbu statističke obrade [103], čime se uzimaju u obzir za daljnji proračun i korištenje unutar modela.

6.1. Anketa

Anketa se sastoji od ukupno 55 pitanja. Jednostavno su i jasno strukturirana, traženi su precizni odgovori, a zbog broja pitanja, procijenjeno vrijeme rješavanja je 10 minuta. Ta činjenica osigurava prikupljanje većeg broja odgovora.

Anketa je strukturirana u tri djela:

- Prvi dio odnosi se na općenita, informativna pitanja o ispitaniku te tvrtki koje predstavlja.
- Drugi dio odnosi se na procjenu sadašnjeg stanja s obzirom na unaprijed definirane kriterije i alternative.
- Treći dio je rangiranje kriterija što kasnije omogućuje formiranje stabla kriterija s odgovarajućim utjecajnim čimbenicima.

Na kraju, postavljeno je opisno pitanje u kojem ispitanik, po vlastitom izboru, navodi vlastito mišljenje o utjecaju automatizacije i digitalizacije odjela projektiranja tehnoloških procesa na buduće stanje tvrtke.

Anketa je strukturirana tako da se dobije uvid u poznavanje i korištenje sljedećih segmenata Industrije 4.0 na razini hardvera, softvera i organizacije tvrtke:

- *Povezanost hardvera* odnosi se na povezanost fizičkih komponenti te trenutne mogućnosti povezanosti.. Opisuje mogućnosti fizičkog povezivanja čitavog sustava što dalje, u većini slučajeva, omogućuje i lakšu mogućnost virtualnog povezivanja. Kao takav odnosi se na odjel kao sustav tj. na fizičko povezivanje njegovih samostalnih jedinica, povoljnost njihovog međuodnosa, međusobna funkcionalnost i upravljivost, te eventualna povezanost sa obradnim strojevima.
- *Računalna infrastruktura* odnosi se na trenutno stanje samostalnih hardverskih jedinica potrebnih za rad. Bilo da se radi direktno o korisničkim jedinicama ili

jedinicama sustava, ovaj potkriterij opisuje stupanj razvoja i relevantnosti postojećeg hardvera i njegovih trenutnih mogućnosti. Osim samostalnih jedinica, poput računala, ovdje je uključen i generalna hardverska infrastruktura kao što su serveri, upravljačke jedinice, senzori te ostale postojeće hardverske značajke koje se koriste u radu tvrtke.

- *Fleksibilnost hardvera* je jedna od temeljnih odrednica koncepta Industrije 4.0. U smislu hardvera, ova se komponenta odnosi na mogućnosti prilagodbe postojećeg hardvera, njegove prenamjene i razne potrebne modifikacije koje su u novopredstavljenom okruženju prilično česte.
- *Modularnost hardvera* odnosi se na postojanje zasebnih hardverskih modula koji mogu funkcionirati kao samostalne cjeline ili se mogu prenamijeniti i formirati s drugim segmentima određene grupe. Ocjenjuje se samostalnost hardverskih resursa te njihova mogućnost prilagodbe različitim radnim okruženjima i uvjetima.
- *Održavanje hardvera* odnosi se na trenutno korištenu vrstu održavanja. Prihvatanjem koncepta Industrije 4.0, ovaj se segment poslovanja također modificira, uz veću primjenu prediktivnog održavanja te se što više nastoji izbjeći održavanje po stanju.
- *Povezanost softvera* odnosi se na mogućnosti povezivanja različitih programa, međusobnu povezanost softvera na dvije ili više samostalnih jedinica unutar odjela i cijele tvrtke, ali i na povezanost s vanjskim članovima lanca vrijednosti kao što su kupci, dobavljači i ostali, oni koji imaju utjecaj na projektiranje te na njegove posljedice.
- *Održavanje softvera* opisuje načine održavanja funkcionalnosti i stabilnosti softvera, podrška pri radu te redovitost njegova unapređenja kako ne bi dolazilo do nepovoljnih prekida u PTP koji izazivaju gubitke, ali i potencijalni gubitak važnih podataka i procedura.
- *CPS* (eng. *Cyber Physical Systems*) opisuje u kojoj se mjeri prisutno postojanje kibernetičko-fizičkih sustava, osnovnog dijela strukture koncepta Industrije 4.0.
- *Kapacitet baza podataka* je kriterij u kojem se ispituje postojanje baza podataka, njihovo korištenje i funkcionalnost što omogućuje daljnju gradnju kompleksnijih sustava te provođenje određenih analiza, odnosno projektiranje tehnoloških procesa prema zahtjevima novog koncepta, ali i mogućnosti poslovne analize s ekonomskog aspekta.

- *Fleksibilnost* softvera je ocjena njegove mogućnosti prilagodbe u novim situacijama, korištenje istog softvera u različitim radnim uvjetima uz jednostavnost mogućnosti modifikacije. Također, fleksibilnost omogućuje lakše povezivanje s ostalim dijelovima tvrtke, ali i proizvodnjom, njenim planiranjem i finalnom izvedbom. Također se odnosi na kompatibilnost s ostalim odjelima te prilagodba dobivenim ulaznim podacima potrebnim za analizu i obradu s raznih strana.
- *Potpora pri odlučivanju* je razina korištenja određenih matematičkih metoda implementiranih u softverska rješenja koji pružaju potporu pri donošenju odluke. U projektiranju tehnoloških procesa mnogo je utjecajnih kriterija koji imaju direktan ili indirektan utjecaj na finalni plan izrade, stoga je korištenjem ovih metoda moguće donijeti optimalnu odluku, odnosno formirati optimalan plan izrade.
- *Modularnost* se odnosi na mogućnost samostalnog funkcioniranja određenih korištenih softverskih rješenja te mogućnost njihova što jednostavnijeg povezivanja u grupe koje će postojeće zadatke obavljati bolje ili će kao takvi biti modificirani za drugačije zadatke i način rada.
- *Mogućnost samostalne optimizacije* sustava najviši je nivo koncepta Industrije 4.0 u kojem, na temelju dostupnih podataka iz baze, softverski sustav je u mogućnosti samostalno izvoditi određene aktivnosti te ih unapređivati.
- *Motivacija radnika* ocjenjuje trenutnu motiviranost pojedinog radnika s obzirom na trenutno stanje u odjelu i tvrtki. Veća motiviranost daje bolju produktivnost te mogućnost inovativnih prijedloga koji utječu povoljno na unapređenje, ali i na realizaciju implementacije koncepta Industrije 4.0.
- *Edukacija radnika* ocjenjuje razinu znanja radnika i njihovu spremnost za cjeloživotno učenje i samousavršavanje. Vrlo je bitna komponenta, budući da prihvatanje novog koncepta donosi mnogobrojne izmjene u načinu funkcioniranja sustava i pojedinačnih radnih mjesta te su radnicima potrebna nova znanja i vještine kako bi iste prihvatili, pravilno koristili te ih dalje razvijali i unapređivali.
- *Korištenje društvenih mreža* odnosi se na posebno razvijene društvene mreže kojima radnici međusobno komuniciraju. One služe za prosljeđivanje određenih poslovnih informacija, sadrže informacije o trenutnom stanju unutar tvrtke i njenim segmentima te na korisnički jednostavan način omogućuju brzu i jednostavnu komunikaciju između radnika na raznim hijerarhijskim razinama i odjelima.

- *Decentralizacija organizacijskih jedinica* povezana je s horizontalnom i vertikalnom integracijom sustava u kojem se nalaže što veća samostalnost pojedinih organizacijskih jedinica, u ovom slučaju odjela projektiranja tehnoloških procesa.
- *Komunikacija između organizacijskih jedinica* ocjenjuje trenutno stanje i vrstu komunikacije između organizacijskih jedinica. Međusobna povezanost te dobivanje povratnih informacija s raznih strana direktno utječe na optimizaciju projektiranja tehnoloških procesa, što je, prema novom konceptu, važno da se radi u realnom vremenu, transparentno i kontinuirano.
- *Internetska infrastruktura*. Uvođenje kvalitetne internetske infrastrukture omogućuje se povezanost tehnologa s ostalim članovima odjela projektiranja, povezanost s ostalim dijelovima tvrtke, ali i vanjskim suradnicima. Time se omogućuje i bolja funkcionalnost softvera, ali i mogućnost implementacije određenih softvera kojima se automatizira PTP. Također, koncept nalaže korištenje „cloud computinga“, odnosno pohranjivanje podataka i obrada podataka u „oblaku“, odnosno njihovo pohranjivanje i realizacija na serverima kojima se može pristupiti neovisno o mjestu boravka, što također omogućuje mobilnost i povećanu dostupnost tehnologa.
- *CAM* se odnosi na uvođenje softvera za računalnu podršku projektiranju tehnoloških procesa (eng. *Computer Aided Manufacturing*). Radi se o softverima koji omogućuju 3D modeliranje dobivenog izratka, simulaciju izrade te formiranje G koda koji se dalje prosljeđuje na strojeve. Isti se prilagođava postojećim resursima u tvrtki, postojećem strojnom parku i raspoloživim alatima te automatski računa potrebna vremena dok korisnik određuje vrstu operacija, redoslijed, stroj i alate na kojima će se određeni proizvod izrađivati. Time se digitalizira samo dio projektiranja tehnoloških procesa.
- *CAPP i ERP*. CAPP omogućuje automatsko kreiranje plana izrade, a za rad koristi podatke iz raznih baza. Prvenstveno je poveznica između CAD-a i CAM-a, ali kako bi se PTP prilagodio konceptu Industrije 4.0, potrebno je uvesti i podatke iz ostalih dijelova tvrtke, stoga se CAPP povezuje s ERP sustavom, informacijskim sustavom u kojem se nalaze podaci o svim aktivnostima u tvrtki koji direktno ili indirektno utječu na PTP.
- *Napredni sustavi*. Radi se o najvišoj razini prihvaćanja koncepta Industrije 4.0 u kojem je definiran posebni digitalni sustav, prilagođen potrebama cijele tvrtke koji sadrži sve segmente iste, a plan izrade formira automatski, digitalno i direktno je povezan s odjelom proizvodnje koji na temelju njega formira plan proizvodnje. Ovaj sustav

sadrži i mogućnost samooptimizacije te prikuplja podatke u realnom vremenu, a zadatak čovjeka, tehnologa, je da uvidi mogućnost raznih korištenja podataka u unapređenju korištenih parametara, skraćanju vremena izrade, ali i daljnjem unapređenju funkcionalnost proizvoda.

Kompletna anketa dana je u Prilogu 1.

6.1.1. Prva grupa pitanja

Prva se grupa pitanja odnosi na osobne podatke ispitanika: *Naziv tvrtke, pozicija unutar tvrtke, razina i vrsta obrazovanja, vrsta proizvoda koja se izrađuje, i upoznatost s pojmom Industrije 4.0.*

Odgovori na ova pitanja služiti će kao kriterij prema kojem će se formirati grupe koje će se međusobno uspoređivati statističkim testovima signifikantnosti kako bi se utvrdila mogućnost njihovog utjecaja na spoznaju i korištenje elemenata Industrije 4.0.

6.1.2. Druga grupa pitanja

Druga se grupa pitanja odnosi na procjenu trenutnog stanja unutar tvrtke. Ovdje se nalaze četiri vrste pitanja. Prva su pitanja s jedinstvenim odgovorom DA/NE; druga je ocjenjivanje pojedinog segmenta na skali od 1 do 5 gdje je 1 najslabija ocjena a 5 najveća ocjena; treća su pitanja s ponuđenim odgovorom te mogućnošću višestrukog odabira i upisa vlastite vrijednosti; četvrta kategorija su ona pitanja koja traže opisni odgovor, bilo da se radi o direktnom opisnom odgovoru ili dodatnom pojašnjenju prethodnog pitanja. Pitanja su postavljena s ciljem dobivanja uvida u trenutno korištenje pojedinih segmenata Industrije 4.0 te procjenu trenutne infrastrukture i uvjeta za rad.

6.1.3. Treća grupa pitanja

Treća se grupa odnosi na rangiranje elemenata Industrije 4.0 prema percepciji važnosti za unapređenje, gdje su na prvo mjesto stavili segment koji smatraju da je najvažniji za unapređenje, a na posljednje najmanje važan segment. Sastoji se od četiri pitanja, odnosno četiri grupe elemenata. U prvom se rangiraju prema važnosti glavni elementi „Organizacija i ljudski resursi“, „Hardver“ i „Softver“ dok se u ostala tri rangiraju potkriteriji unutar svake od navedenih grupa.

6.1.3.1. Obrada podataka

Prikupljeno je ukupno 37 odgovora, od čega su iz jedne tvrtke odgovorile po dvije osobe dok je jedna osoba odgovorila anonimno. Zato će se u sljedećim kalkulacijama uzeti ukupno 34

odgovora na anketna pitanja. Sudionici su odgovorili na sva anketna pitanja, budući da je anketa postavljena tako da su isti nužni, osim posljednjeg, opcionalnog.

Sudionici koji su odgovorili na anketu su navedeni u tablici 4.

Tablica 4 Ispitanici preliminarnog istraživanja

Subjekt	Djelatnost	Veličina subjekta	Lokacija
1	obrađa dijelova motora i reperacija turbine	mikro	Viškovo, Rijeka
2	metaloprerađivački obrt, izrada alata za štancanje i brzanje	obrt	Zadar
3	obrađa metala cnc tehnologijama	malo	Belišće
4	CNC tehnologije	malo	Lekenik
5	obrađa svih vrsta metala i plastike	mikro	glogovec zagorski
6	konstruiranje alata i naprava za zavarivanje za automobilsku industriju, izrada prototipova, od ideje do gotovog proizvoda	srednje	Osijek
7	glodanje, tokarenje, PTP	malo	Sveta nedjelja
8	proizvodnja kulglastih slavina i strojna obrađa metala	mikro	Krapina
9	proizvodnja i razvoj tehnologije u obradi metala	malo	Zlatar-Bistrica
10	strojna obrađa, bravarija i zavarivanje, antikorozivna zaštita	malo	Slunj
11	proizvodnja i montaža proizvoda od metala, inženjering, trgovina i usluge	malo	Nedelišće
12	usluge cnc glodanja	mikro	Marčelji
13	servis, prodaja i dorada	mikro	Zagreb
14	proizvođač armatura i fazonskih komada za vodovodne sustave i sustave za odvodnju, energetiku i procesnu industriju	veliko	Varaždin
15	obrađa metala cnc tehnologijama	malo	Belišće
16	proizvodnja visoko preciznih dijelova od metala na CNC glodalici	mikro	Gat
17	metalne konstrukcije	srednje	Zagreb
18	razvoj i proizvodnja sustava za upravljanje upravljanje kinematičkim sustavima u videoprodukciji	malo	Veliko Polje
19	strojna obrađa metala	obrt	Zagreb
20	proizvodnja i konstrukcija alata za finalni proizvod, strojna obrađa metala, brizgani proizvodi od plastike	mikro	Poljanica bistranska
21	strojna obrađa metala i izrada gumenih tehničkih proizvoda	malo	Zagreb
22	servis i remont alatnih strojeva	mikro	Zagreb
23	proizvodnja metalnih proizvoda i konstrukcija	obrt	Oroslavlje
24	strojna obrađa i izrada proizvoda od metala i tehničke plastike	obrt	Zagreb
25	autodijelovi, prekidači	malo	Zagreb
26	proizvodnja metalnih konstrukcija i proizvoda	mikro	Samobor
27	obrađa metala i nemetala, proizvodnja strojeva, alata i metalne galanterije	mikro	Varaždin
28	proizvodnja vrlo složenih strojenih dijelova za širok spektar industrije	srednje	Škarnik
29	bravarija, strojna obrađa, CNC obrađa	obrt	Zagreb
30	strojna obrađa metala	mikro	Bjelovar
31	savijanje šipki, cijevi, profila te izrada sičnih konstrukcijskih	mikro	Županja

Subjekt	Djelatnost	Veličina subjekta	Lokacija
	elemenata		
32	proizvođač točione opreme i automata	malo	Koprivnica
33	nepoznato	nepoznato	nepoznato
34	CNC obrada metala	mikro	Soblinec

Prva grupa anketnih pitanja koristi se kao kriterij prema kojem će se rezultati dijeliti u dvije grupe, odnosno dva uzorka koji će se testirati na međusobne razlike te tako vidjeti je li određeni čimbenik presudan u danim odgovorima, za što će se koristiti Mann Whitney U-test.

6.2. Odabrani statistički testovi hipoteza: Mann Whitney U-test i Wilcoxon rank sum test

Mann-Whitney U-test je neparametrijski test koji se koristi za testiranje hipoteze dva uzorka koja dolaze iz iste populacije (npr. imaju isti medijan). Premda se radi o neparametrijskom testu, pretpostavlja se da su dvije distribucije sličnog oblika. Test se koristi za manje uzorke kada je broj podataka manji od 30 [104].

Pretpostavka je da postoji uzorak od n_x podataka ($x_1, x_2, x_3 \dots x_n$) u jednoj grupi (npr. jedne populacije) i uzorak od n_y podataka ($y_1, y_2, y_3 \dots y_n$) u drugoj grupi (npr. iz druge populacije).

Mann-Whitney test bazira se na usporedbi svakog podatka x_i iz prvog uzorka sa svakim podatkom y_i iz drugog uzorka. Ukupni broj usporedbi u paru je $n_x n_y$.

Ako uzorci imaju isti medijan, tada svaki x_i ima jednaku šansu (npr. vjerojatnost 1/2) da je veći ili manji od y_i .

Hipoteze se formiraju na sljedeći način:

H_0 - ne postoji značajna razlika u odgovorima dviju grupa

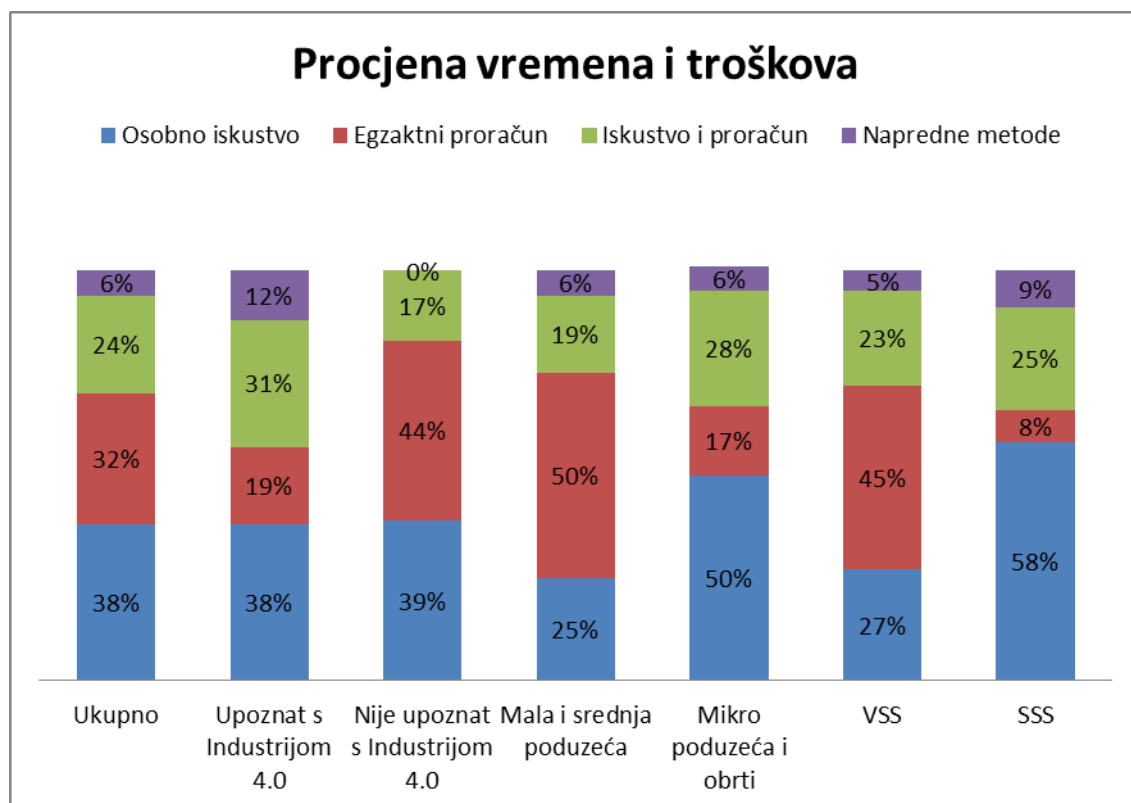
H_1 - postoji značajna razlika u odgovorima dviju grupa

Broji se koliko je puta x_i iz prvog uzorka veći od y_i iz drugog uzorka. Taj se broj označava s U_x . Pod nultom hipotezom očekuje se da su U_x i U_y približno jednaki.

Dio anketnih podataka, u kojima je tražen odgovor kao dio linearne skale, statistički su obrađeni u programu Matlab [105], gdje korišten ekvivalent Mann Whitney U-testa, Wilcoxon rank sum test [106]. Drugi dio podataka, čiji je odgovor binarnog karaktera (DA/NE), uspoređeni su prema dobivenim vrijednostima kao takvima. Detaljna analiza podataka prema Mann-Whitney U-testu dana je u Prilogu 2.

6.2.1. Rezultati - procjena vremena i troškova

Jedan od najvažnijih koraka u PTP-u je proračun vremena i troškova. Teži se minimizaciji subjektivnosti pojedinca, potiče se korištenje matematičkih metoda. U digitalnom okruženju Industrije 4.0, procjena vremena i troškova radi se automatski, uz pomoć naprednih matematičkih metoda (prediktivne analitike) i računalne simulacije. Zato su ispitanici trebali odgovoriti kako određuju vrijeme izrade i troškove, a rezultati su prikazani na slici 29.



Slika 29 Procjena vremena izrade i troškova

38% ispitanika koristi tradicionalni pristup te kreira plan izrade na temelju vlastite intuicije i iskustva. 32% koriste matematičke metode dok 24% koriste kombinaciju navedenih. 6% koristi napredne metode, a to su (prema njihovom daljnjem opisu) simulacija u CAM-u, kombinacija intuicije i CAM-a te napredni sustavi.

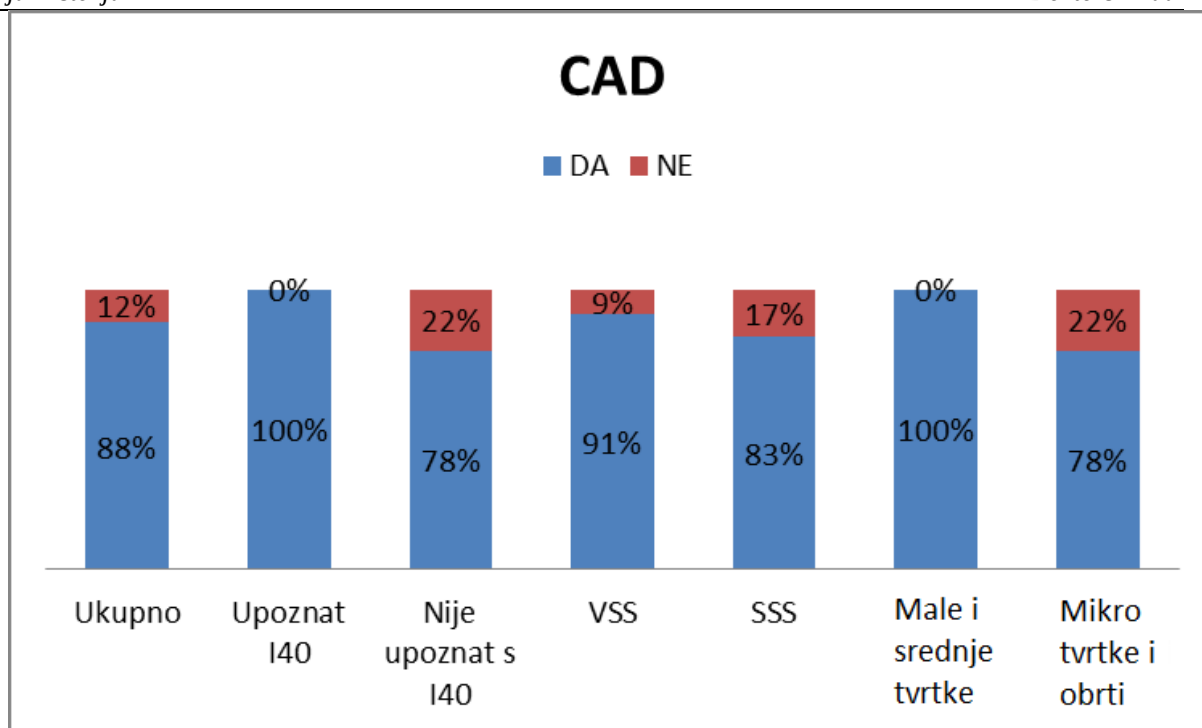
Zanimljivo je kako većina ispitanika koji su se izjasnili da poznaju pojam Industrije 4.0 još uvijek koriste tradicionalni pristup (38%) dok 31% koristi kombinirani pristup. 12% koristi napredni pristup, što znači da svi ispitanici koji koriste napredni pristup upoznati su s pojmom Industrije 4.0. Oni koji su se izjasnili da ne poznaju Industriju 4.0 većinom koriste matematički pristup (44%) dok 39% koristi tradicionalni pristup.

Kada se rezultati sagledaju prema veličini tvrtke, može se zaključiti da većina (50%) pristupnika iz mikro tvrtki i obrta koriste tradicionalni pristup dok 50% ispitanika iz malih i srednjih tvrtki koristi matematički pristup. Korištenje naprednih metoda ne ovisi o veličini tvrtke te je jednako distribuirana u obje grupe.

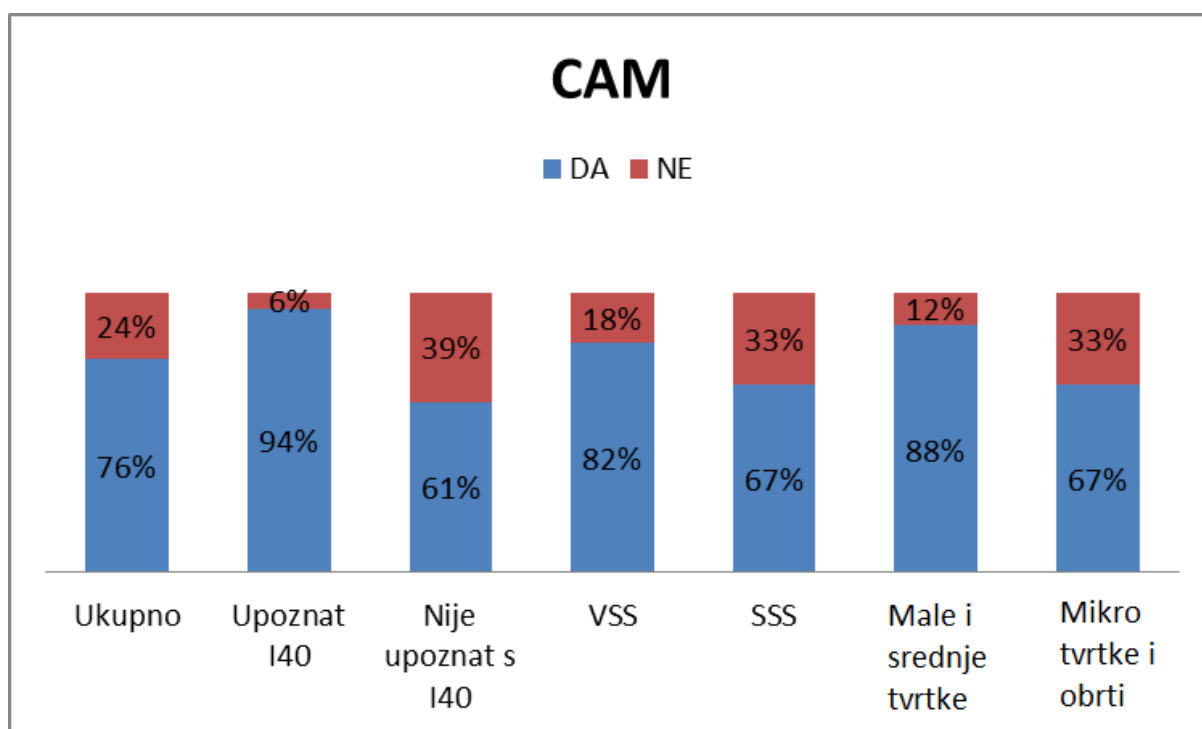
Kada se razmatra obrazovanje ispitanika, 45% visokoobrazovanih ispitanika koristi matematički pristup dok 58% ispitanika srednjeobrazovanih ispitanika koristi tradicionalni pristup, što je značajna razlika između ove dvije grupe. 88% ispitanika iz malih i srednjih tvrtki visoko su obrazovani dok je među mikro tvrtkama i obrtima 44% ispitanika visokoobrazovano.

6.2.1.1. Rezultati - korištenje CAD i CAM sustava, poznavanje CAPP sustava

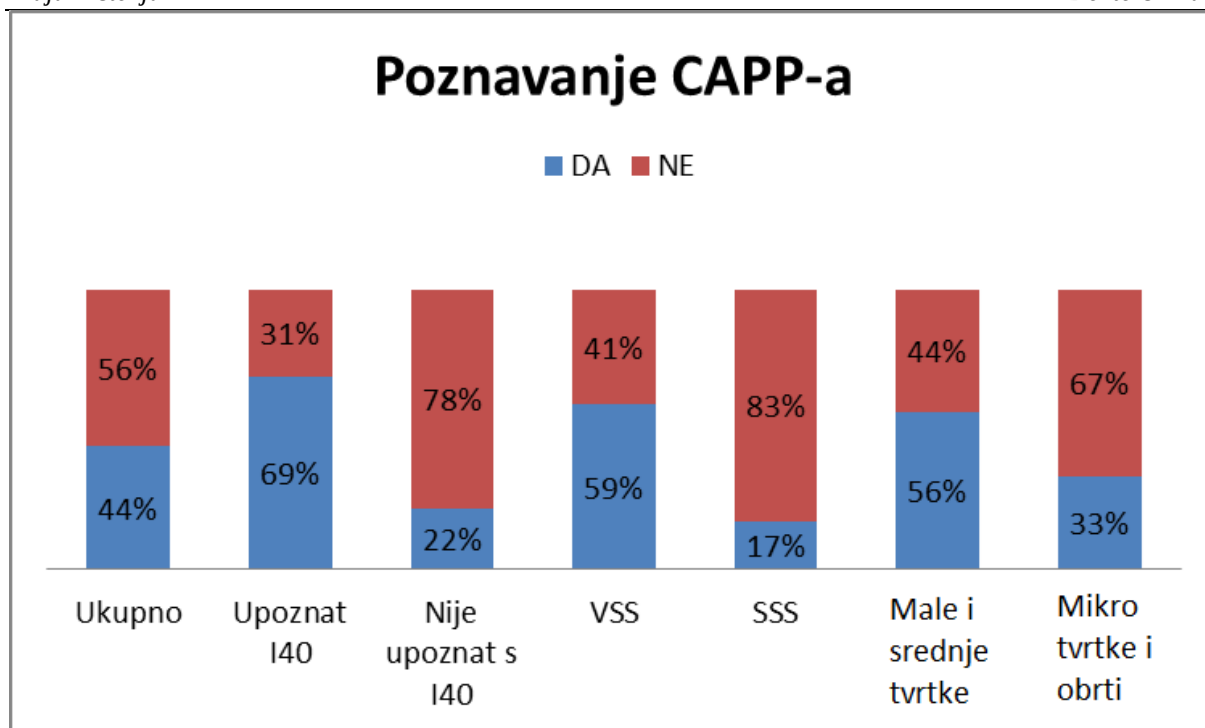
Prvi korak digitalizacije PTP-a jest korištenje CAD-a, odnosno mogućnost računalne manipulacije tehničkom dokumentacijom proizvoda. Sljedeći je korištenje CAM-a koji omogućuje 3D modeliranje proizvoda te simulaciju tehnološkog procesa. CAPP, kao poveznica između CAD-a i CAM-a omogućuje automatsku definiciju plana izrade te je jedan korak ispred potpune automatizacije koja dodatno uključuje manipulacijom velike količine podataka, vrhunsku infrastrukturu, povezanost sa svim dijelovima lanca vrijednosti, samooptimizaciju te posebne organizacijske karakteristike. CAPP se rijetko koristi u hrvatskim tvrtkama, a kao takav je izazov i za velike svjetske lidere, što potvrđuje i činjenica da je samo 44% ispitanika upoznato s ovim pojmom. Najpopularniji softver je CAD kojeg koristi 88% ispitanika dok CAM koristi 76% ispitanika (slika 30, 31 i 32).



Slika 30 Korištenje CAD softvera



Slika 31 Korištenje CAM softvera



Slika 32 Poznavanje CAPP sustava

Svi koji poznaju Industriju 4.0 koriste CAD, 94% istih koristi CAM, te je 69% njih upoznato s CAPP sustavom. 78% onih koji nisu upoznati s pojmom Industrije 4.0 koristi CAD, 61% CAM dok je 22% čulo za CAPP sustave. Vidljiva je blaga razlika među grupama, odnosno da naprednijim softverskim tehnikama naginju oni koji su bolje upoznati s mogućnostima digitalizacije.

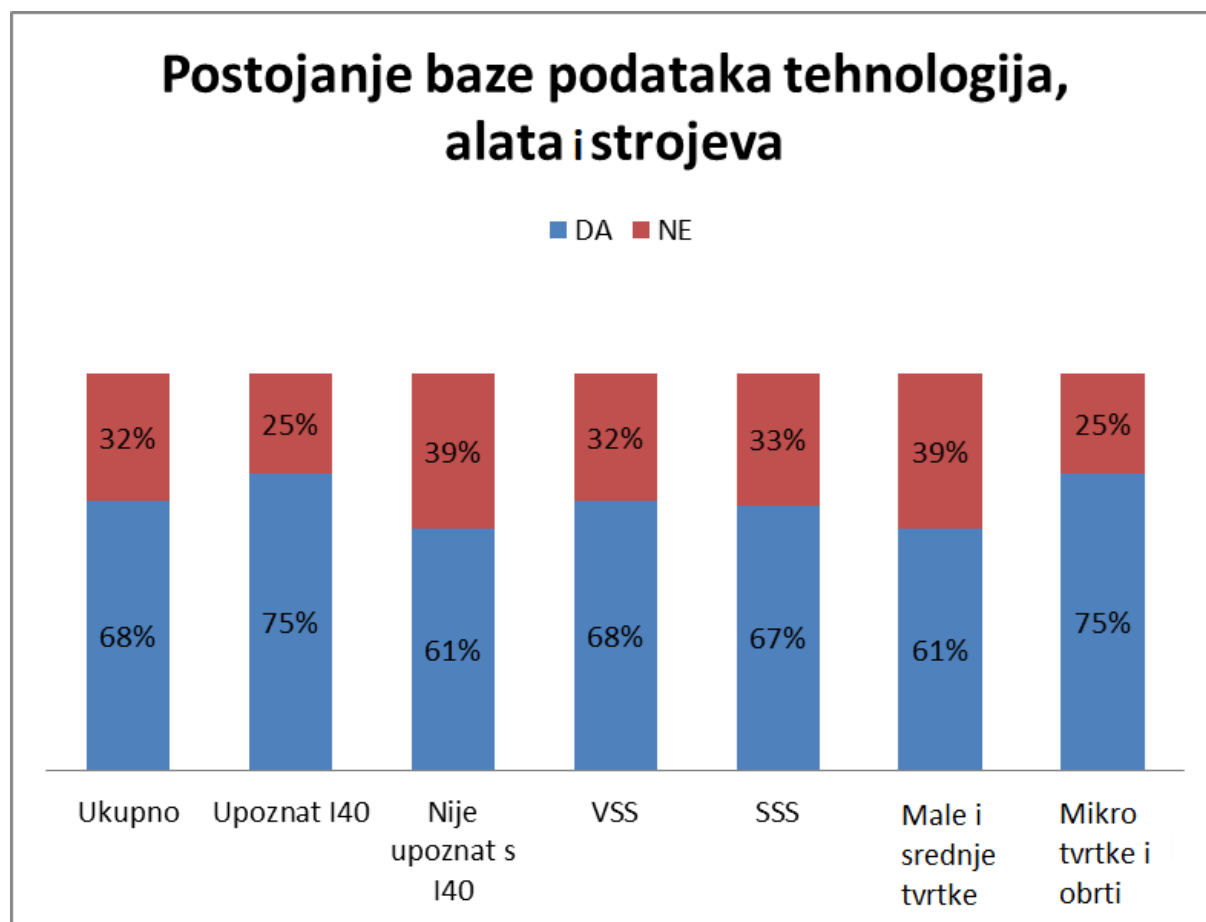
Svi ispitanici iz malih i srednjih tvrtki koriste CAD 88% CAM te je 56% upoznato s CAPP sustavima. 78% ispitanika iz mikro tvrtki i obrta koristi CAD, 67% CAM te ih je 33% upoznato s CAPP sustavom. Tako je vidljivo da je tendencija digitalizaciji veća kod malih i srednjih tvrtki.

Kada se promatra razina obrazovanja, korištenje CAD sustava je približno jednak i kod visoko i srednje obrazovanih (91% i 83%), korištenje CAM-a je blago niži kod korisnika s srednjim obrazovanjem (82% i 67%) dok je primijećena značajna razlika u poznavanju CAPP sustava gdje 59% visokoobrazovanih ispitanika poznaje CAPP te samo 17% srednjeobrazovanih.

6.2.1.2. Rezultati - manipulacija velikom količinom podataka (eng. Big Data Manipulation)

Jedna od najvažnijih karakteristika Industrije 4.0 je manipulacija velikom količinom podataka – njihovo prikupljanje, pohranjivanje, prosljeđivanje i obrada u realnom vremenu. Kako bi se

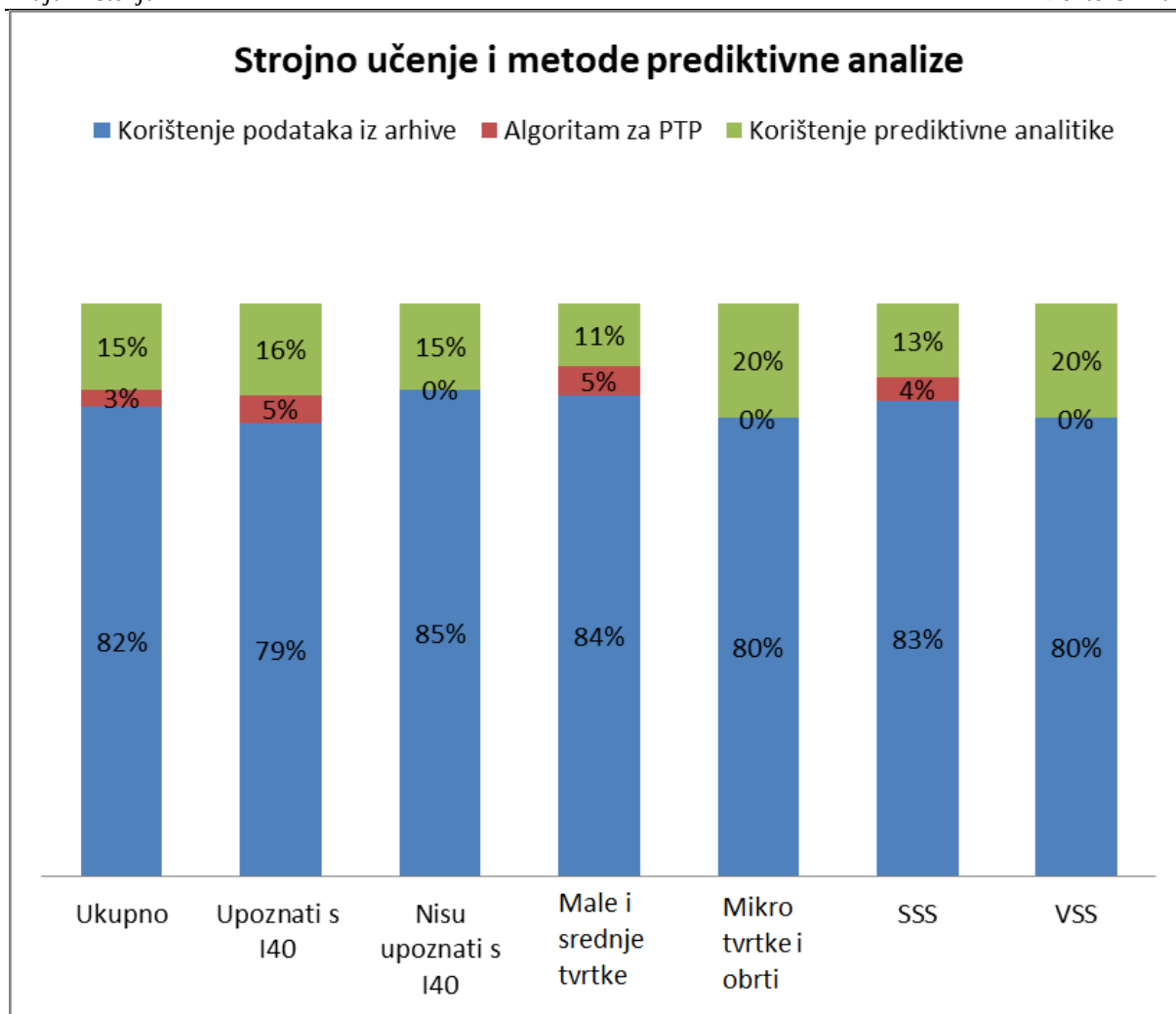
u potpunosti omogućila, zahtijeva postojanje vrhunske internetske infrastrukture, baza podataka te poznavanje i korištenje prediktivne analitike implementirane unutar sustava.



Slika 33 Razvoj i prisutnost baza podataka

Ako se uzme u obzir postojanje baze podataka s informacijama o tehnološkim procesima, strojevima, alati

ma te ostalim stavkama potrebnima za PTP, 68% ispitanika izjasnilo se da ista postoji u njihovoj tvrtki. Značajnih razlika između skupina nema, primijećena je veća tendencija korištenja baza među ispitanicima upoznatima s industrijom 4.0 te onih iz malih i srednjih tvrtki.

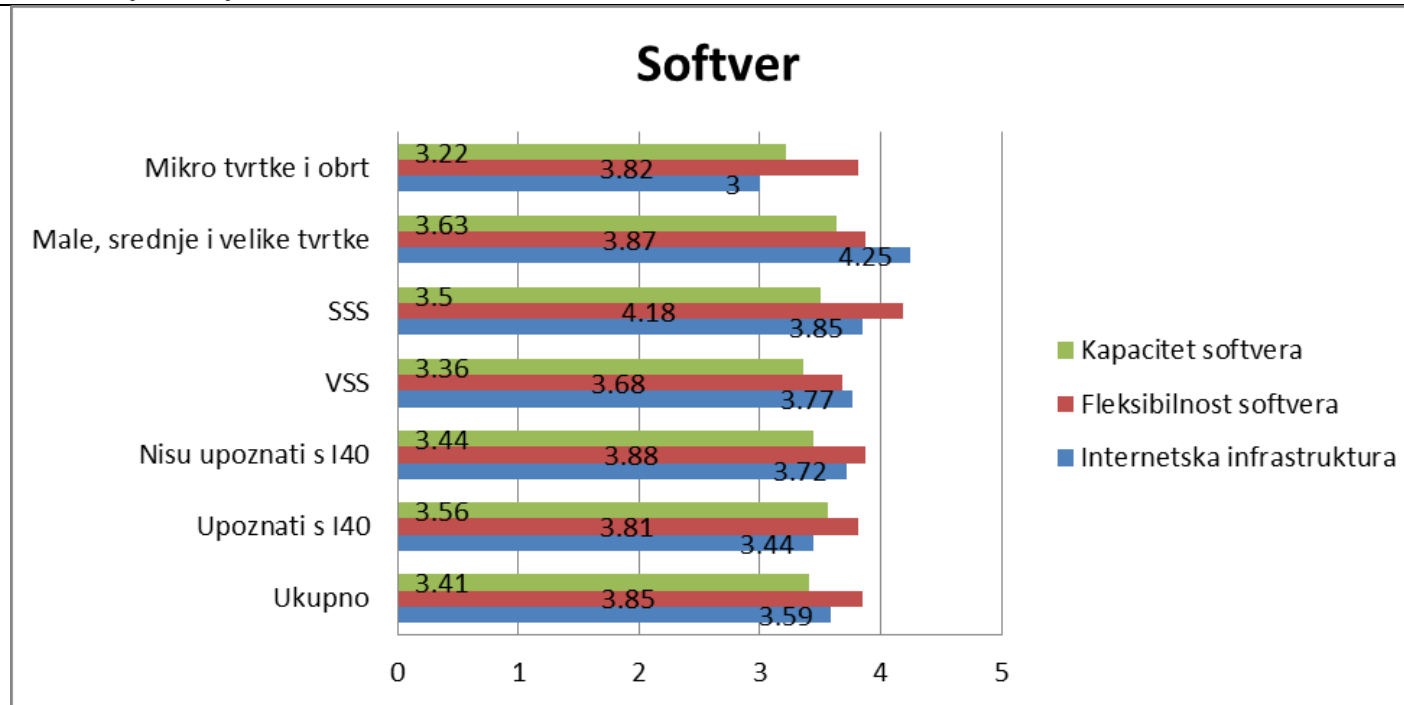


Slika 34 Prediktivna analitika i strojno učenje

No, baze koje postoje ne koriste se na način koji zahtjeva Industrija 4.0 jer samo 15% ispitanika koristi metode prediktivne analitike pri projektiranju tehnoloških procesa, dok se velika većina oslanja na manualnu obradu podataka iz arhive (Slika 34)

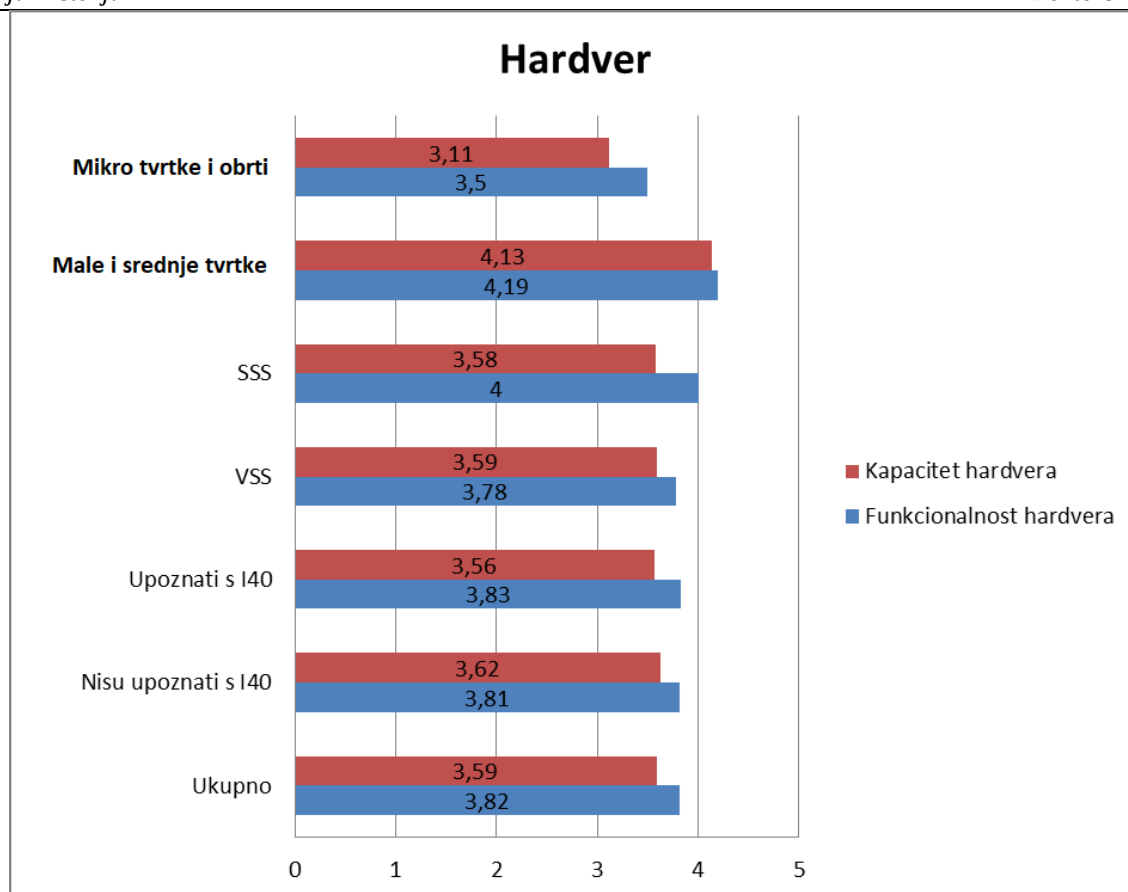
6.2.1.3. Rezultati - kapacitet hardvera i softvera

Digitalizacija zahtijeva visokokvalitetnu funkcionalnost hardvera i softvera. Zato su se ispitanici trebali izjasniti o funkcioniranju njihove trenutne internetske infrastrukture te o fleksibilnosti, funkcionalnosti i kapacitetu softvera i hardvera koji se trenutno koristi u tvrtki. Evaluacija se obavljala na skali od 1 (izuzetno loše) do 5 (vrhunski). Razlike među skupinama testirane su Mann-Whitney U-testom s pogreškom prve vrste od 5% gdje je postavljena hipoteza da ne postoji razlika između skupina. Alternativna hipoteza govori o tome da postoji značajna razlika između skupina.



Slika 35 Evaluacija softvera

Prosječna ocjena internetske infrastrukture je 3,59, fleksibilnosti softvera 3,85, a njegova kapaciteta 3,41 (slika 35). Signifikantna razlika uočena je kod malih i srednjih tvrtki koji su vlastitu internetsku infrastrukturu ocijenili s 4,25, čime je potvrđena alternativna hipoteza u usporedbi rezultata s mikro tvrtkama i obrtima s $p=0,0017$, s obzirom na graničnu vrijednost od $p=0,05$ označava značajnu razliku. Srednjeobrazovani ispitanici dali su najvišu ocjenu fleksibilnosti svojeg softvera (4,18) dok poznavanje Industrije 4.0 nije se pokazalo presudnim u ovom segmentu.

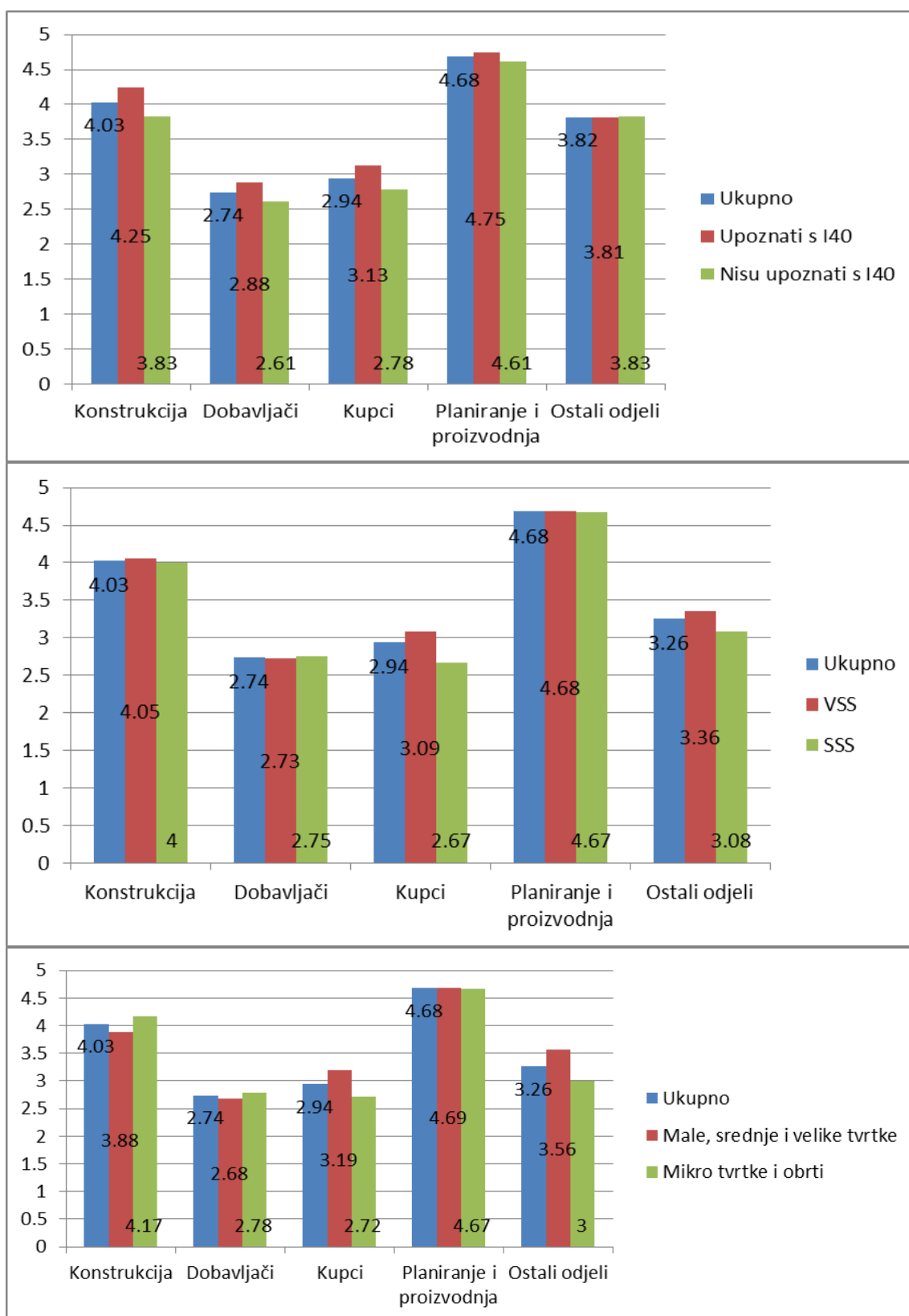


Slika 36 Evaluacija hardvera

Funkcionalnost hardvera ispitanici su u prosjeku ocijenili s 3,82 dok je kapacitet ocijenjen s nešto nižom ocjenom, 3,59. I u ovom slučaju poznavanje Industrije 4.0 nije se pokazao kao presudan čimbenik, no značajna razlika ponovno je uočena kod veličine tvrtke – male i srednje tvrtke dala su puno višu ocjenu i u jednoj i drugoj kategoriji (4,13 i 4,19) od onih iz mikro tvrtki i obrta (3,11 i 3,5) što je potvrđuje i Mann Whitney U-test s $p=0,0063$ i $p=0,002$. Male i srednje tvrtke zbog veličine te investicijskih mogućnosti i vlastite tradicije imaju percepciju većih kapaciteta i bolje funkcionalnosti hardvera, dok postoji mogućnost da su obrti i mikro tvrtke centraliziraniji sustavi koji percipiraju problem potrebnih trenutnih kapaciteta, bilo da se radi o investicijskoj prirodi problema ili u povišenoj potražnji na tržištu, no za točan zaključak je potrebno provesti daljnja istraživanja.

6.2.1.4. Rezultati - horizontalna integracija

Horizontalna i vertikalna integracija jedan su od sastavnih zahtjeva Industrije 4.0. Horizontalna integracija podrazumijeva povezanost u cijelom lancu vrijednosti, brz i lak prijenos i dostupnost podataka, što se također odražava i na optimizaciju PTP-a, kao i ostalih lokalnih aktivnosti.

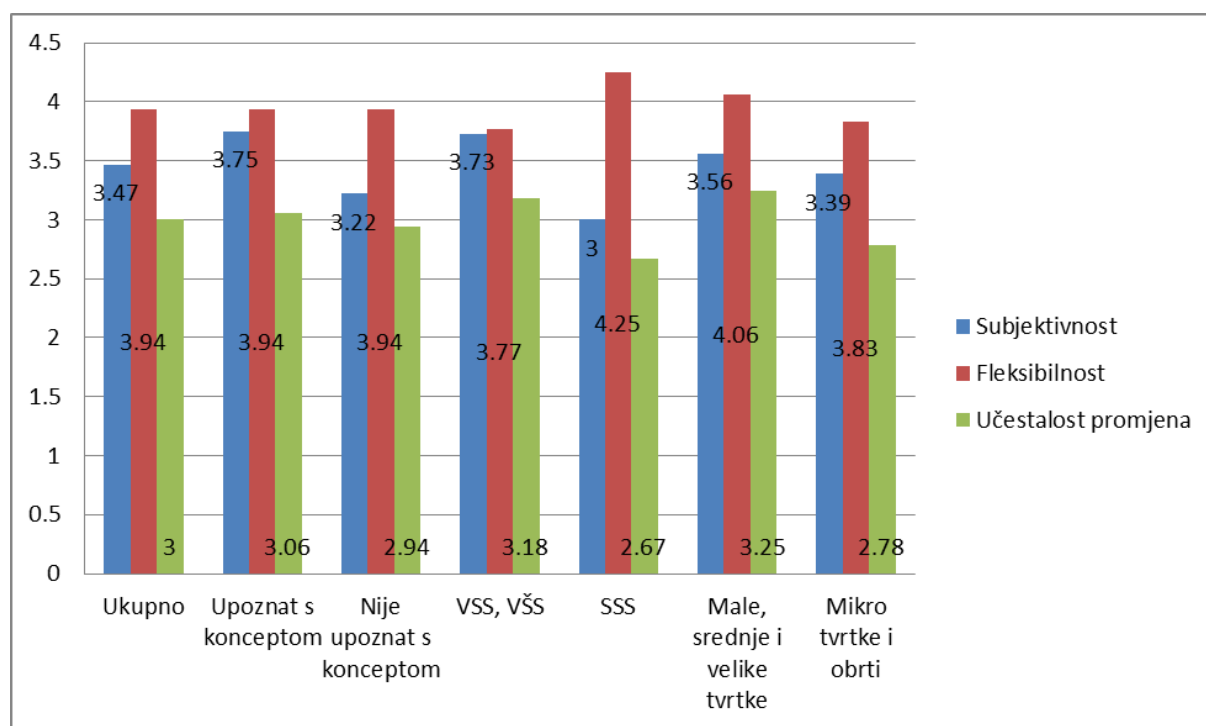


Slika 37. Horizontalna integracija

Rezultati pokazuju da je odjel tehnološke pripreme najviše povezan s odjelima konstrukcije te planiranjem proizvodnje. Radi se o logičnom rezultatu, budući da je isti u lancu vrijednosti između ova dva odjela. Konstrukcija mu prethodi, a proizvodnja slijedi. Najmanju povezanost imaju s dobavljačima (2,74) i kupcima (2,94). Značajna razlika uočena je u veličini tvrtke i to u komunikaciji s ostalim odjelima gdje male i srednje tvrtke češće komuniciraju s ostalim odjelima (3,56 i 3,00).

6.2.1.5. Rezultati - utjecaj ljudskog čimbenika

Tradicionalni pristup karakterizira visoki udio ljudske subjektivnosti. Zato su ispitanici trebali procijeniti trenutnu razinu utjecaja subjektivnosti pri PTP-u, također mogućnost njihovog utjecaja na promjene i fleksibilnost u radnoj okolini.



Slika 38 Utjecaj ljudskog čimbenika

Budući da je cilj minimizirati subjektivnost, zaključuje se kako je ocjena 3,47 poprilično visoka, a još je viša kod onih koji su upoznati s konceptom I40 (3,76). Zanimljivo je kako visokoobrazovani ispitanici smatraju da postoji viša razina subjektivnosti (3,76) dok oni srednjeobrazovani izjasnili su se s prosječnom ocjenom 3 ($p=0,0369$).

Ispitanici imaju visoku percepciju razine fleksibilnosti u radu, s prosječnom ocjenom od 3,94, a najvišu razinu imaju srednjeobrazovani ispitanici (4,25).

Nisu toliko skloni kontinuiranoj promjeni koja je u prosjeku ocijenjena najnižom ocjenom, 3. Najmanje fleksibilni su oni srednjeobrazovani (2,67), a najviši oni iz malih i srednjih tvrtki (3,25).

6.2.2. Prioriteti za unapređenje

U trećem dijelu ankete, ispitanici su zamoljeni poredati pojedine elemente Industrije 4.0 prema prioritetu za unapređenje unutar njihove tvrtke. Elementi su podijeljeni u tri grupe, prikazano u tablici 5. Rangovi su izračunati u softveru Statistica [107], na način koji je definiran i u Friedmanovom testu [108] te prikazani u tablici 6.

Tablica 5 Elementi Industrije 4.0 za rangiranje

Hardver		Softver		Organizacija i ljudski resursi	
Element	Kod	Element	Kod	Element	Kod
Povezanost hardvera	H-1	Povezanost softvera	S-1	Motivacija radnika	OR-1
Senzori	H-2	CAM	S-2	Edukacija radnika	OR-2
Računalna infrastruktura	H-3	CAD	S-3	Korištenje društvenih mreža	OR-3
Serveri	H-4	Održavanje softvera	S-4	Decentralizacija	OR-4
Fleksibilnost hardvera	H-5	Kibernetско-fizički sustavi	S-5	Komunikacija unutar odjela	OR-5
Modularnost hardvera	H-6	Kapacitet baza podataka	S-6		
Održavanje hardvera	H-7	Fleksibilnost softvera	S-7		
		Podrška pri odlučivanju	S-8		
		Modularnost sustava	S-9		
		Društvene mreže	S-10		
		Samooptimizacija	S-11		

Tablica 6 Ljestvica rangova elemenata Industrije 4.0 prema prioritetima

HARDVER													
Ukupno		Upoznati s I40		Nisu upoznati s I40		Male i srednje tvrtke		Mikro tvrtke i obrti		Visoko obrazovanje		Srednje obrazovanje	
H-5	3,3333	H-5	2,7500	H-3	3,1875	H-2	3,1786	H-5	3,5667	H-5	3,3333	H-5	3,3333
H-3	3,6667	H-1	3,6071	H-4	3,7813	H-5	3,2143	H-7	3,5667	H-3	3,5000	H-6	3,6111
H-1	3,9333	H-6	4,1071	H-5	3,8438	H-1	3,6786	H-4	3,7000	H-4	3,6667	H-1	3,6667
H-4	3,9500	H-3	4,1429	H-6	3,8750	H-6	4,0714	H-1	4,0000	H-1	4,0476	H-7	3,7222
H-6	3,9833	H-4	4,2143	H-7	3,9375	H-4	4,2143	H-6	4,0667	H-6	4,1429	H-3	4,0556
H-7	4,2167	H-7	4,5357	H-1	4,2188	H-7	4,7500	H-3	4,1000	H-7	4,4286	H-4	4,6111
H-2	4,9167	H-2	4,6429	H-2	5,1563	H-3	4,8929	H-2	5,0000	H-2	4,8810	H-2	5,0000

SOFTVER													
Ukupno		Upoznati s I40		Nisu upoznati s I40		Male i srednje tvrtke		Mikro tvrtke i obrti		Visoko obrazovanje		Srednje obrazovanje	
S-1	3,9444	S-1	4,0385	S-1	3,8571	S-1	3,3750	S-1	4,2857	S-2	3,9737	S-1	3,4375
S-2	4,6111	S-2	4,8077	S-2	4,4286	S-2	4,7917	S-2	4,6071	S-1	4,1579	S-7	4,3125
S-7	4,9074	S-3	4,8077	S-7	4,6786	S-7	5,0417	S-7	4,9643	S-3	4,6316	S-8	5,0625
S-3	5,2222	S-7	5,1538	S-3	5,6071	S-3	5,6250	S-3	5,0714	S-7	5,1579	S-6	6,0000
S-4	6,0926	S-4	5,5000	S-6	6,2143	S-11	5,6250	S-4	5,5714	S-4	5,9737	S-2	6,1250

S-6	6,3704	S-8	6,3462	S-10	6,2143	S-8	6,1667	S-6	6,3929	S-9	6,2368	S-4	6,3750
S-8	6,4074	S-6	6,5385	S-8	6,4643	S-9	6,1667	S-5	6,5000	S-11	6,4211	S-10	6,4375
S-11	6,5556	S-9	6,7692	S-4	6,6429	S-6	6,3750	S-8	6,6429	S-6	6,5263	S-3	6,6250
S-9	6,7778	S-11	6,9231	S-9	6,7857	S-4	6,4167	S-11	7,1429	S-8	6,9737	S-5	6,6875
S-5	7,1481	S-5	7,2692	S-5	7,0357	S-5	7,7083	S-10	7,2143	S-5	7,3421	S-11	6,8750
S-10	7,9630	S-10	7,8462	S-11	8,0714	S-10	8,7083	S-9	7,6071	S-10	8,6053	S-9	8,0625

ORGANIZACIJA I LJUDSKI RESURSI

				Nisu upoznati s I40		Male i srednje tvrtke		Mikro tvrtke i obrti		Visoko obrazovanje		Srednje obrazovanje	
Ukupno		Upoznati s I40											
OR-2	2,2424	OR-2	2,0625	OR-1	2,3235	OR-2	2,3667	OR-1	2,1765	OR-1	2,3409	OR-1	1,8636
OR-1	2,2576	OR-1	2,1875	OR-3	2,4118	OR-1	2,4000	OR-2	2,1765	OR-2	2,4545	OR-2	2,0455
OR-5	2,7424	OR-5	2,8750	OR-5	2,6176	OR-5	2,6000	OR-5	2,8529	OR-5	2,8636	OR-5	2,5000
OR-4	3,7576	OR-3	3,9375	OR-4	3,5882	OR-4	3,6667	OR-4	3,7941	OR-4	3,5682	OR-4	4,1364
OR-3	4,0000	OR-4	3,9375	OR-2	4,0588	OR-3	3,9667	OR-3	4,0000	OR-3	3,7727	OR-3	4,4545

U skupini “hardver” najviši prioritet ima element fleksibilnosti, slijedi ga računalna infrastruktura i povezanost hardvera. Što se tiče razlika među pojedinim skupinama, mala i srednje tvrtke najveći prioritet dala su senzorima, dok su ostala ovaj element ocijenila najnižom važnošću. Mikro tvrtke i obrti dali su visoki prioritet održavanju hardvera dok su ostali isti rangirali među posljednjima. Oni koji nisu upoznati s Industrijom 4.0 najnižu važnost dali su povezanosti hardvera, što se lako može povezati sa činjenicom pripadnosti ovoj grupi, budući da je povezanost jedna od najvažnijih stavki pametne tvrtke. U skupini „softver“ najveći prioritet dan je povezanosti softvera, a prate ga CAM sustavi i fleksibilnost softvera. Unapređenje CAM-a korak je u digitalizaciji PTP-a prema usvojenju CAPP sustava. Najnižu važnost dali su društvenim mrežama koje omogućuju jednostavnu i efikasnu komunikaciju unutar organizacije i kibernetičko-fizičkim sustavima koji su izuzetno kompleksni za implementaciju te nisu kao takvi direktno povezani s PTP-om. Značajne razlike u rangiranju pojedinih elemenata između grupa nisu primijećene.

U skupini „organizacija i ljudski resursi“, svaka je grupa najvišu važnost dala motivaciji i edukaciji radnika, dok je ponovno najniža važnost dana društvenim mrežama, ali i decentralizaciji. Motivacija i edukacija radnika vrlo su važne komponente tvrtke, budući da promjena polazi od prihvatanja radnika na svim razinama organizacijske strukture. Njihovom edukacijom otklanja se strah od nepoznatog, odnosno strah od promjene, ali i omogućuje da nauče principe novog, digitalnog okruženja. Percepcija korištenja specijaliziranih društvenih mreža unutar tvrtke, još se uvijek veže za korištenje komercijalnih rješenja, koji ne iniciraju poslovno korištenje, stoga je ova važnost percipirana niskom. Također, decentralizacija na

određeni način znači pristup ovlaštenjima i važnim podacima pojedincima koji do sada nisu imali tu mogućnost, stoga je razina percepcije važnosti ovog segmenta još uvijek niska.

6.2.3. Perspektiva za unapređenje i diskusija

Rezultati su pokazali kako je PTP u Hrvatskoj još uvijek pod velikim utjecajem tradicionalnog pristupa koji se bazira na intuiciji i znanju jedne osobe, što je jasan indikator da je promjena neizbježna i neophodna. 38% ispitanika svoje odluke temelji isključivo na vlastitom iskustvu dok 32% koristi matematičke kalkulacije, što se može definirati kao nešto napredniji pristup, no još nedovoljno blizu pristupa koji zahtijeva Industrija 4.0. 26% kombinira ova dva pristupa dok samo 6% koristi napredniji pristup koji je korak ka digitalizaciji. Upoznatost s Industrijom 4.0 nije se pokazala kao presudan čimbenik kod razlike u pristupu PTP-u, kao ni u ocjeni trenutne radne okoline. Jedina korelacija uočena jest da oni koji ne poznaju industriju 4.0 nisu upoznati ni s pojmom CAPP sustava.

Razlike su primijećene u veličini tvrtke, a posebna je razlika uočena u zadovoljstvu internetskom infrastrukturom. Male i srednje tvrtke ocijenili su vlastitu s visokom 4,25 dok su mikro tvrtke i obrti dali prosječnu ocjenu 3. Također postoji razlika u kapacitetu hardvera gdje su ga prvi ocijenili s 4,13, a drugi s 3,11. Također su zamijećene razlike u funkcionalnosti komunikacijskih kanala i arhiviranju podataka, u čemu ponovno prednjače male i srednje tvrtke koja također imaju veću tendenciju korištenja matematičkog pristupa PTP-u pred tradicionalnim.

Razina edukacije ispitanika također je imala utjecaj na rezultate. Značajna razlika primijećena je u ocjeni subjektivnosti unutar projektiranja – visokoobrazovani naveli su puno veći utjecaj subjektivnosti u projektiranju od onih srednjeobrazovanih (3,78 i 3). Čak 60% visokoobrazovanih je upoznato s CAPP sustavima dok je to 16% srednjeobrazovanih. Kako bi se dobio pravi uvid u razloge zašto postoji ovakva percepcija, potrebno je napraviti daljnje istraživanje. Poznavanje CAPP sustava moglo bi se opisati kao naglasak koji se stavlja u visokom obrazovanju na napredne metode PTP-a, dok se u srednjem naglasak stavlja na praksu i tradicionalne metode. No, to danas ne treba biti razlog, stoga ova zanimljiva tema ostaje kao jedan od potencijalnih smjerova budućeg istraživanja.

Kod ocjenjivanja infrastrukture, hardvera i softvera nisu primijećene značajnije razlike, kao ni u organizacijskom smislu. Ono što je zanimljivo jest da nitko ne koristi posebni algoritam za PTP, a nekoliko njih (6%) koristi prediktivnu analitiku.

Pregled elemenata Industrije 4.0, uz srednje ocjene percepcije njihovog trenutnog stanja ili postotak korištenja u ispitanim tvrtkama uz ciljne vrijednosti za budućnost i potrebne radnje unapređenja dan je u tablici 7.

Tablica 7 Elementi Industrije 4.0 i njihova perspektiva

Element Industrije 4.0	Prosječna ocjena ili postotak korištenja	Cilj	Potrebne radnje
Hardver			
Računalna infrastruktura	3.59	Jedna od najvažnijih karakteristika Industrije 4.0, sa zahtjevom visoke funkcionalnosti te u skladu s najnovijim trendovima na tržištu.	Povećati kvalitetu internetske infrastrukture na najvišu razinu dostupnu u lokalnoj zajednici tvrtke. Razgovor s lokalnim distributerima internetske mreže i vlastima oko uvođenja bolje internetske infrastrukture kao ključnog elementa industrije 4.0.
Funkcionalnost hardvera	3.82	Funkcionalnost je potrebno dovesti na najvišu moguću razinu, omogućiti proaktivno održavanje kako se ne bi javili gubici te ostvarila izvrsnost funkcionalnosti.	Povećati funkcionalnost hardvera, potreba za uvođenjem modernih hardverskih elemenata.
Kapacitet hardvera	3.59	Potrebno je postići funkcionalni kapacitet koji je adaptivan i fleksibilan, jednako funkcionalan i optimalan u razdoblju neočekivanih povećanja i smanjenja potreba istog.	Uskladiti kapacitet hardvera potrebama.
Softver			
Cloud Computing	12%	Internetski-bazirani procesi, svaka radnja je razvijena i odvija se u oblaku (eng. Cloud). Podaci, informacije i znanje su u istom pohranjeni.	Moguće ostvariti nakon razvoja potrebne internetske infrastrukture.
Povezanost softvera	4,18	Svaki dio lanca vrijednosti treba biti povezan softverom kako bi mogao izmjenjivati podatke, informacije i znanje.	Blago unapređenje povezanosti softvera moguće je ostvariti boljom internetskom infrastrukturom.
Fleksibilnost	3.85	Omogućuje brze izmjene prema potrebama i trendovima na tržištu. Skraćuje vrijeme tranzicije i omogućuje stabilnu i inovativnu funkcionalnost sustava.	Zbog niske fleksibilnosti, povećanje trebalo bi biti uzeto u obzir kao važan i prioritetni čimbenik.
CAM	76%	Svepristuno korištenje CAM-a kao dio naprednog računalnog sustava.	Uvesti tamo gdje se još uvijek ne koristi.
CAD	88%	Svepristuno korištenje CAD-a kao dio naprednog računalnog sustava.	Uvesti tamo gdje se još uvijek ne koristi.
Kapacitet softvera	3.5	Kapacitet softvera predstavlja koliko je softver spreman podnijeti naglih promjena u opterećenju istog; povezano s kapacitetom radne i interne memorije. Treba biti fleksibilan, funkcionalan i neograničen.	Povećati kapacitet softvera na razinu pouzdane funkcionalnosti uz mogućnost daljnjeg unapređenja.
Baze podataka	68%	Baze podataka esencijalni su dio za buduće prediktivno ponašanje sustava. Moraju biti funkcionalne, dostupne,	Intezivirati razvoj baza podataka i arhiva planova izrade, digitalizacija istih, kako bi se mogle koristiti za

Element Industrije 4.0	Prosječna ocjena ili postotak korištenja	Cilj	Potrebne radnje
		samoodržive te jednostavne za manipulaciju od strane korisnika.	prediktivnu i automatsku definiciju budućih planova izrade.
Prediktivna analitika	18%	Predviđanje potrebe za alatima, dostupnosti strojeva, sirovim materijalom te optimalnim korištenjem tehnologija.	Osvijestiti važnost korištenja prediktivne analitike kod korisnika, njihova edukacija i finalno korištenje kao standardnog alata pri PTP-u.
CAPP	44%	CAPP kao srž „Pametnog projektiranja tehnoloških procesa“	Educirati tehnologe o korisnosti i mogućnostima CAPP-a. Implementirati sustav u radnu okolinu uz njegovo povezivanje s ostalim segmentima I40.
Samooptimizacija	0	Bazirana na prodacima prikupljenima iz svih dijelova lanca vrijednosti, svaki novi automatski generirani plan izrade svojevrsno je unapređenje prethodnoga.	Prvi korak je napraviti procjenu kako i gdje koristiti sustave za samooptimizaciju.
Kapacitet baza podataka	68% Excel, 3% Access, 6% CAM, 6% Advanced 68% Excel	Fleksibilni kapacitet omogućuje kontinuirano unapređenje i omogućuje stabilnu funkcionalnost sustava.	Izbjegavati korištenje Excela, razviti korisniku prilagođene online baze podataka koji omogućuju manipulaciju velikom količinom podataka, koje su povezane s ostalim dijelovima lanca vrijednosti te omogućuju timski rad..
Manipulacija velikom količinom podataka (eng. Big Data Manipulation)	6%	Efektivno, jednostavno, pouzdano i brzo..	Potrebno je educirati korisnike o konceptu manipulacije velike količine podataka, njihovom korištenju i prednostima. Definirati vrstu podataka te uspostaviti korelaciju s KPI-evima. Razvoj kustomiziranog sustava za analizu i prilagodbu.
Korištenje društvenih mreža	42%	Brza, pouzdana i sigurna unutarnja komunikacija u tvrtki.	Proširiti korištenje društvenih mreža za jednostavnu i sigurnu komunikaciju među ljudima unutar organizacije.
Organizacija i ljudski resursi			
Edukacija radnika	47%	U potpunosti educirani u vidu novih digitalnih tehnologija, mehanizama kontrole, optimizacije sustava i procesu cjeloživotnog učenja.	Povisiti edukaciju radnika u smislu osvješćivanja važnosti Industrije 4.0, digitalnih tehnologija i važnosti njihove funkcije u sustavu.
Motivacija radnika	4.59	Maksimizirati motivaciju zbog velikih inicijalnih i budućih kontinuiranih promjena unutar nepredvidljive radne okoline.	Motivacija je na dovoljno visokoj razini da bi se započela transformacija, motiviraniji radnici pomogli bi pri uvjeravanju onih koji stvaraju otpore promjenama te još uvijek ne uviđaju benefite digitalizacije.
Komunikacija unutar odjela	3.64	Brza, jednostavna, pouzdana i sigurna komunikacija između odjela.	Povisiti razinu komunikacije u svakom dijelu organizacije.
Decentralizacija	3.72	Postoći potpunu horizontalnu i vertikalnu integraciju.	Centralizacija je još uvijek jako izražena te je potrebno izraditi strategiju oslabljivanja iste te definirati organizacijske promjene.

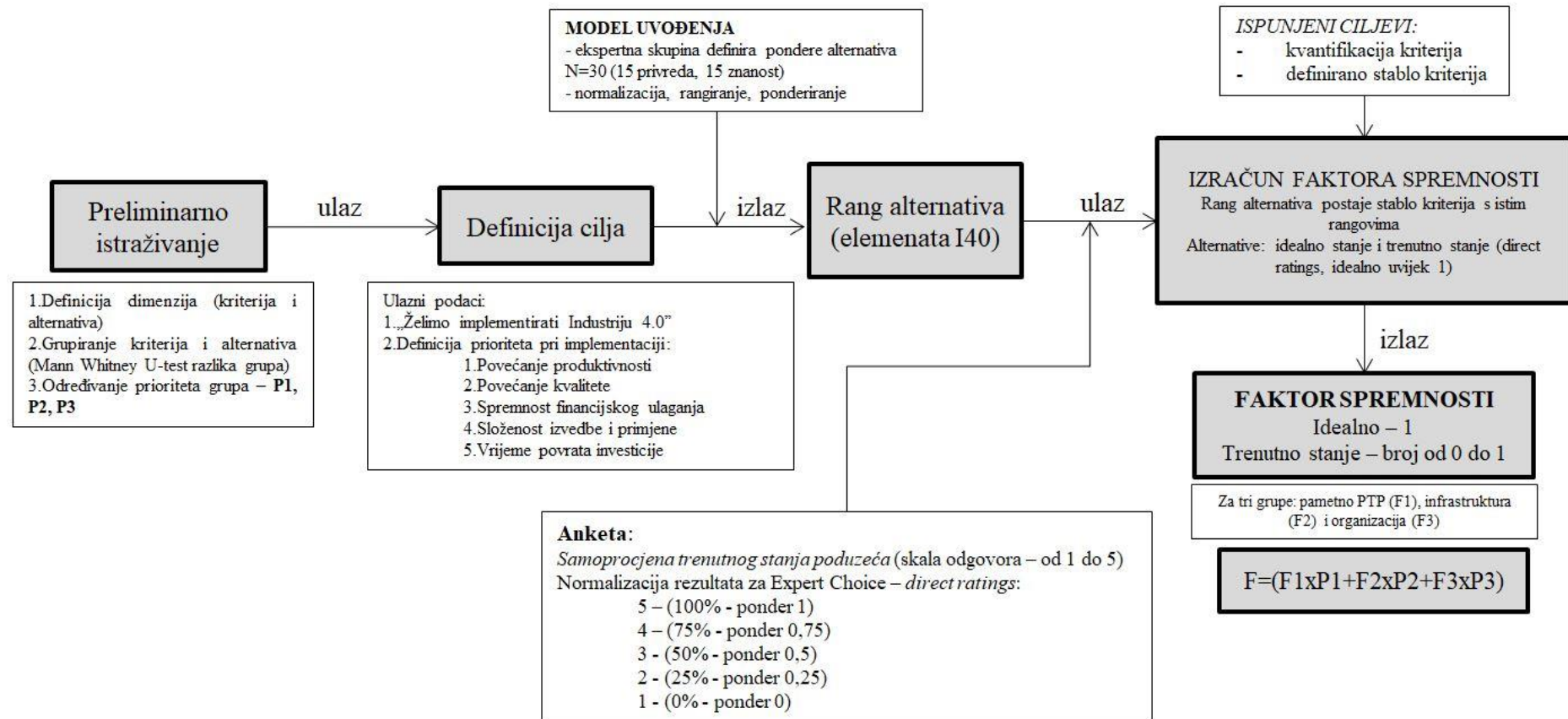
Element Industrije 4.0	Prosječna ocjena ili postotak korištenja	Cilj	Potrebne radnje
Subjektivnost korisnika	3.47	U potpunosti minimizirati.	Minimizirati utjecaj ljudske subjektivnosti koja je trenutno izuzetno visoka. Prvi korak je implementacija matematičkih metoda, druga je korištenje CAM sustava, a treća CAPP sustava i finalno automatske definicije plana izrade.
Fleksibilnost korisnika	3.94	Maksimizirati zbog inovativnog pristupa i visoke razine motivacije kako bi se osigurala primjenjivost realizirala implementacija ideja.	Potrebno je blago povećanje, budući da je fleksibilnost na relativno visokoj razini.
Okruženje promjene	3	Nepredvidljivo tržište i radna okolina, korisnici trebaju biti spremni na prilagodbu promjena češće nego inače.	Edukacijom osvijestiti benefite koje promjene donose i kako se nositi s promjenama.
Lean alati	12%	Korištenje lean alata i kaizen filozofije kao dio kontinuiranog unapređenja u svakom segmentu djelovanja.	Educirati korisnike o prednostima lean alata i kaizen filozofije, razviti plan implementacije istih u sustav.

7. MODEL ZA IZRAČUN ČIMBENIKA SPREMNOSTI TVRTKE ZA INDUSTRIJU 4.0 USMJEREN NA PROJEKTIRANJE TEHNOLOŠKIH PROCESA

Kako bi se procijenilo trenutno stanje tvrtke, prepoznali potencijali te razvio optimalan strateški plan za uvođenje koncepta Industrije 4.0, najprije je potrebno proračunati čimbenik spremnosti koji pokazuje gdje se trenutno nalazi tvrtka u odnosu na idealno, željeno buduće stanje. Zato je razvijen model za izračun čimbenika spremnosti tvrtke usmjeren na projektiranje tehnoloških procesa. Za definiciju su korišteni rezultati preliminarnog istraživanja "Projektiranje tehnoloških procesa i Industrija 4.0", opisanih u poglavlju 6, istraživanje "Digitalizacija odjela projektiranja tehnoloških procesa", dosadašnje spoznaje o izračunu čimbenika spremnosti za Industriju 4.0 iz znanstvene literature (poglavlje 2) te definiranom principu projektiranja tehnoloških procesa u Industriji 4.0 (pametno projektiranje tehnoloških procesa – PPTP), opisanog u poglavlju 4.

Shematski prikaz modela dan je na slici 39.

U preliminarnom istraživanju, rezultati su dobiveni na temelju ankete u hrvatskim tvrtkama čija je temeljna djelatnost strojna obrada metala. Istraživanje „Projektiranje tehnoloških procesa i Industrija“ imalo je za cilj otkriti poznavanje koncepta Industrije 4.0, svjesnost o važnosti među ciljanom populacijom te trenutno korištenje određenih njenih elemenata. Također, iz ankete su dobiveni podaci o važnosti pojedinih elemenata Industrije 4.0, odnosno njihov prioritet za unapređenje, kao i prioriteti pojedinih skupina elemenata koji će se koristiti kao važna smjernica u finalnom modelu za izračun čimbenika spremnosti te definiciji tranzicijske strategije. Istraživanje je pokazalo kako veličina tvrtke, razina obrazovanja i edukacija zaposlenika ne pokazuju značajan utjecaj na trenutno stanje u tvrtki, kao ni shvaćanju koncepta Industrije 4.0. Razlike su u razini procjene zadovoljstva funkcionalnosti pojedinog elementa, što ne utječe na strukturu modela za izračun čimbenika spremnosti, već će se odraziti u rezultatima kao viša razina spremnosti za prihvaćanje novog, digitalnog koncepta.



Slika 39 Model izračuna čimbenika spremnosti usmjeren na projektiranje tehnoloških procesa

Sljedeći korak je definicija cilja, odnosno odluke tvrtke da želi uvesti koncept Industrije 4.0, kao temeljne motivacije za daljnje provođenje studije. Slijedi određivanje prioriteta tvrtke, odnosno što žele postići unutar radnog okruženja uvođenjem novog koncepta. Ovaj korak predstavlja ulazne podatke koje definira predstavnik tvrtke, a sastoji se od sljedećih mogućnosti, definiranih na temelju izvora iz literature (poglavlje 2) već ranije provedenih sličnih modela uvođenja određenih koncepta u proizvodni sustav [109], [110], [111] te iskustva:

1. povećanje produktivnosti,
2. povećanje kvalitete,
3. spremnost financijskog ulaganja,
4. složenost izvedbe i primjene,
5. očekivano vrijeme povrata investicije.

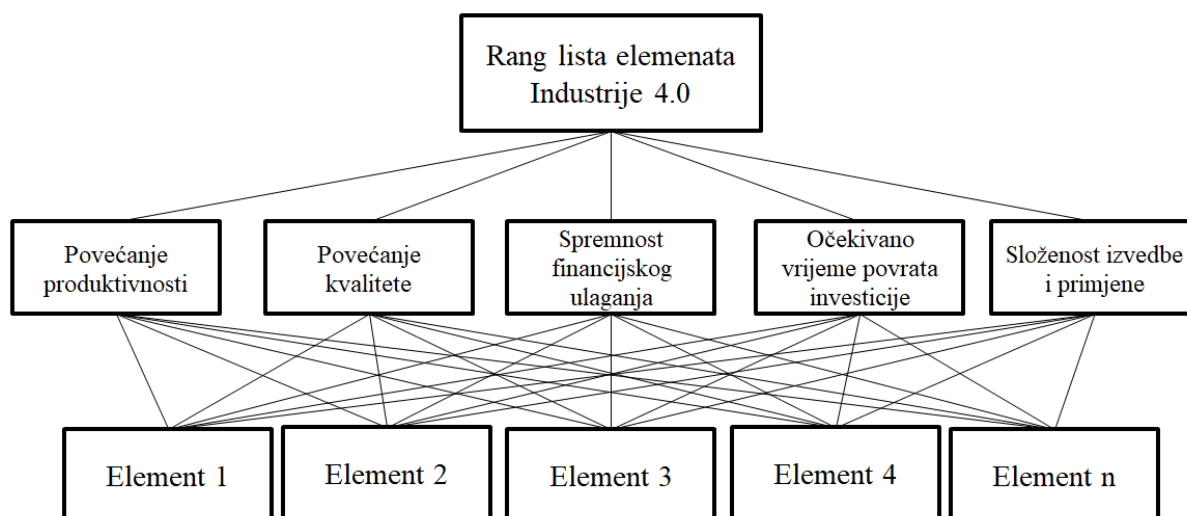
Model za izračun čimbenika spremnosti baziran je sustavimu za potporu pri odlučivanju, a metoda koja će se koristiti pri izračunu je analitički hijerarhijski proces (AHP metoda), te u ovom koraku navedenih pet ciljeva preuzimaju ulogu kriterija. Stoga im je potrebno odrediti prioritete međusobnom usporedbom, što radi krajnji korisnik, odnosno predstavnik tvrtke. Usporedba se odvija na Saatyjevoj skali u kojoj 1 označava jednaku, a 9 najveću važnost pojedinog kriterija te se ispunjava matrica prioriteta prikazana na slici 40.

	Povećanje produktivnosti	Povećanje kvalitete proizvoda	Spremnost financijskog ulaganja	Složenost izvedbe i primjene	Vrijeme povrata investicije
Povećanje produktivnosti		x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}
Povećanje kvalitete proizvoda	x_{21}		x_{23}	x_{24}	x_{25}
Spremnost financijskog ulaganja	x_{31}	x_{32}		x_{34}	x_{35}
Složenost izvedbe i primjene	x_{41}	x_{42}	x_{43}		x_{45}
Vrijeme povrata investicije	x_{51}	x_{52}	x_{53}	x_{54}	

Slika 40 Matrica prioriteta ciljeva tvrtke

Ulazni podaci služe za definiciju prioriteta pojedinih elemenata Industrije 4.0 za uvođenje u tvrtku. Elementi su grupirani u tri grupe, sukladno skupinama preliminarnog istraživanja – „Pametno projektiranje tehnoloških procesa (PPTP)“, koje je ekvivalent skupini „Softver“, „Infrastruktura“, koje je ekvivalent skupini „Hardver“ te istoimena „Organizacija i ljudski

resursi“. Njihovo strukturiranje bit će opisano u narednim poglavljima, a struktura prvog dijela modela prikazana je na slici 41.



Slika 41 Struktura modela uvođenja pojedinih modela Industrije 4.0 usmjerenih na PTP

Izlazni podaci, redoslijed elemenata prema skupinama dobiva se na temelju izraza (2).

$$\begin{bmatrix} a_{11} & b_{12} & c_{13} & d_{14} & e_{15} \\ a_{21} & b_{22} & c_{23} & d_{24} & e_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & b_{i2} & c_{i3} & d_{i4} & e_{i5} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \\ f_{41} \\ f_{51} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} \\ g_{21} \\ \dots \\ g_{i1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdje su:

a_{ij} – ponderi vremena povrata investicije

b_{ij} – ponderi povećanja kvalitete proizvoda

c_{ij} – ponderi povećanja produktivnosti

d_{ij} – ponderi spremnosti financijskog ulaganja

e_{ij} – ponderi složenosti izvedbe i primjene

f_{ij} – vrijednosti vektora prioriteta tvrtke dobiven AHP metodom

g_{ij} – rangovi

i – broj elemenata Industrije 4.0

$j=5$, broj kriterija

Prema tome, rangiranje elemenata Industrije 4.0 vršit će se u skladu sa sljedećim:

- uvođenje elemenata koji omogućuju veću produktivnost, što znači da elementi koji utječu na povećanje produktivnosti imati veći ponder

- uvođenje elemenata koji omogućuju veću kvalitetu proizvoda, što znači da elementi koji utječu na povećanje kvalitete proizvoda imati veći ponder
- uvođenje elemenata u koje je tvrtka spremnije financijski uložiti, što znači da elementi u koje su tvrtke spremnija ulagati imati veći ponder
- uvođenje elemenata s manjom složenošću izvedbe i primjene, što znači da elementi koja su jednostavnija za izvedbu i primjenu imati veći ponder
- uvođenje elemenata s kraćim vremenom povrata investicije, što znači da elementi s kraćim vremenom povrata investicije imati veći ponder

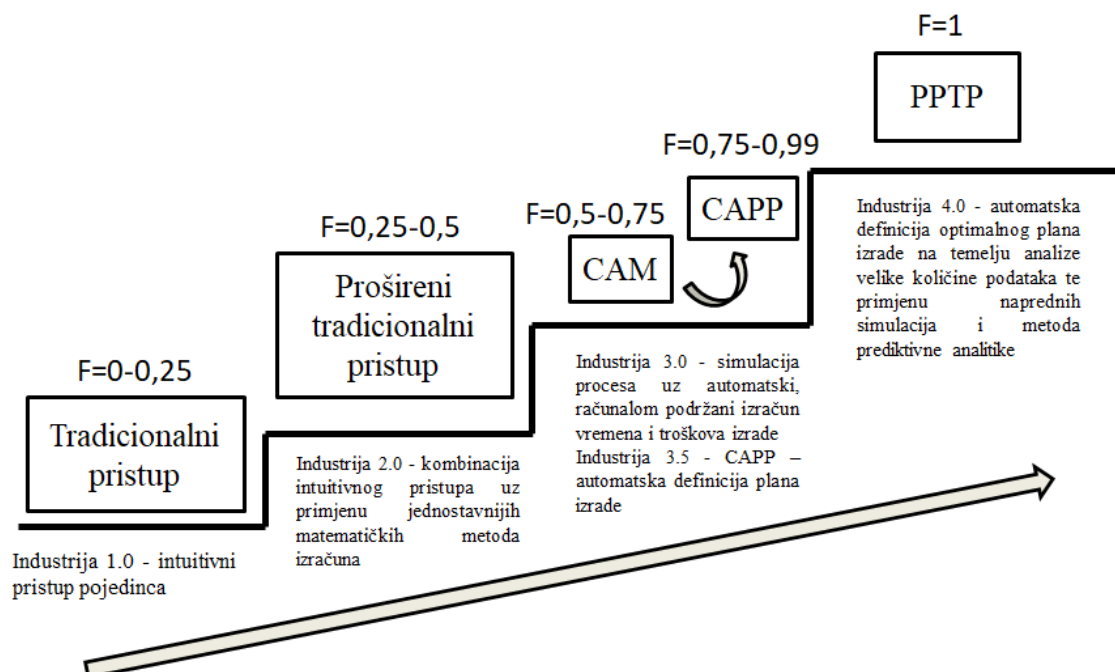
Ponderi, u skladu s gore navedenim ciljevima, dobiveni su istraživanjem „Digitalizacija odjela projektiranja tehnoloških procesa“, provedenog unutar ekspertne grupe od 30 sudionika (15 iz privrede i 15 iz znanosti), koji imaju iskustva u području projektiranja tehnoloških procesa. Isti su pojedine elemente, sukladno danim kriterijima, trebali evaluirati na skali od 1 do 9, gdje 1 predstavlja najmanju, a 9 najveću važnost. Kako bi se dobili relevantni ponderi u skladu s gore navedenim ciljevima, u pojedinim su se kriterijima u obradi podataka modificirali podaci - ako je maksimalna ocjena bila 9, ona se promijenila u 1, 8 u 2 i tako sve do ocjene 1 koja se promijenila u 9; kod kriterija složenost izvedbe i primjene te očekivano vrijeme povrata investicije. Kompletan anketni prikaz je u Prilogu 3.

Ponderi su dobiveni na sljedeći način – na temelju rezultata ankete izračunati su rangovi, zatim su ponderi izračunati postupkom normaliziranog vektora. On se dobije kao suma prosječnih rangova svih elemenata Industrije 4.0. Nakon toga se ponder pojedinog elementa računa tako da se njegova prosječna vrijednost podijeli sa sumom prosječnih vrijednosti rangova svih elemenata. Ponderi će se zaokruživati prema matematičkom pravilu na 4 decimalna mjesta, a suma svih pondera mora biti 1,00. Dobiveni vektor prioriteta tvrtke množit će se s matricom vektora prioriteta koja se sastoji od pondera elemenata dobivenih pomoću gore navedenih anketnih istraživanja, prema izrazu (2).

Vektor prioriteta tvrtke (rang elemenata) služi kao ulazni podatak pri konačnom koraku izračuna čimbenika spremnosti. Izlaz (alternative) postaje ulaz (kriteriji) čiji je međusobni odnos prioriteta definiran kvantitativno, čime se minimizira utjecaj subjektivnosti. Radi se o načinu kvantifikacije kvalitativnih kriterija koji će dodatno biti opisan u daljnjim poglavljima, te je naveden kao jedan od znanstvenih doprinosa ovog rada.

Kako bi se utvrdilo trenutno stanje u tvrtki te usporedilo s idealnim, uz izračun čimbenika spremnosti, korisnik čije tvrtke se evaluira treba ispuniti upitnik „Samoprocjena spremnosti tvrtke za Industriju 4.0“, dan u Prilogu 6 koji će detaljnije biti opisan u nastavku. Korisnik u

istom odabire jednu od pet mogućih opcija opisa trenutnog stanja pojedinog elementa Industrije 4.0 u njegovoj tvrtki, gdje 1 označava najmanji (element ne postoji unutar tvrtke) stupanj razvijenosti a 5 najviši (element je u potpunosti u skladu s Industrijom 4.0). Ovaj je princip evaluacije trenutnog stanja, definiran sukladno već do sada objavljenim i u praksi priznatim radovima iz područja ([7], [10], [12], [15], [16], [19], [20], [21], [27]) te se bazira na stupnjevima razvoja ovisnima o karakteristikama pojedinih industrijskih revolucija. Kako bi se rezultati prilagodili AHP metodi, odnosno kako bi se izvršila normalizacija, oni se u matematičkom proračunu čimbenika spremnosti transformiraju u skalu od 0 do 1, odnosno ocjena 1 poprima vrijednost 0, ocjena 2 vrijednost 0,25, ocjena 3 vrijednost 0,5, ocjena 4 vrijednost 0,75 te ocjena 5 vrijednost 1. Tvrtku je tako moguće usporediti s idealnim modelom čija je vrijednost svakog elementa uvijek 1. Tako se, uzimajući u obzir ciljeve tvrtke, prema važnostima pojedinih kriterija i evaluaciji trenutnog stanja dobiva čimbenik spremnosti za Industriju 4.0 usmjerenoga na projektiranje tehnoloških procesa. Ukupni čimbenik spremnosti tvrtke izračunat će se kao aritmetička sredina čimbenika pojedinih grupa pomnoženih s ponderom važnosti pojedine grupe, a tvrtke će se nakon svrstati u pet skupina, odnosno stupnjevima razvoja sukladnih karakteristikama pojedine industrijske revolucije, kao što je prikazano na slici 42.



Slika 42 Povezanost čimbenika spremnosti i stadija razvoja PTP-a

Oni s čimbenikom između 0-0,25 pripadaju skupini tradicionalista, odnosno principu Industrije 1.0. Kod projektiranja tehnoloških procesa, to se odnosi na definiciju plana izrade

intuitivnim pristupom pojedinca. Oni s čimbenikom između 0,25 i 0,5 imaju karakteristike Industrije 2.0, to je kombinacija intuitivnog pristupa uz primjenu jednostavnijih matematičkih metoda izračuna vremena i cijene izrade. Tvrtke s čimbenikom između 0,5 do 0,75 imaju karakteristike industrije 3.0, što se odnosi na mogućnost korištenja računala pri definiciji plana izrade, korištenje alata kao što su CAD i CAM uz automatski, računalom podržani izračun vremena i troškova izrade, te odabir određenih karakteristika tehnoloških procesa iz računalne baze podataka. Tvrtke s čimbenikom od 0,5 do 0,75 imaju karakteristiek Industrije 3,5, što je prijelazno razdoblje između 3.0 i 4.0 gdje se podrazumijeva korištenje CAPP sustava. Oni s čimbenikom 1 u potpunosti su usvojili koncept Industrije 4.0.

7.1. Formiranje stabla kriterija

Kriteriji za ocjenu čimbenika spremnosti kreirani su na temelju dosadašnjih teorijskih postava Industrije 4.0 i izračuna čimbenika spremnosti u znanstvenoj literaturi, detaljnije opisanoj u poglavlju 2. Općeniti pristup svakom čimbeniku spremnosti jest definicija dimenzija te daljnja evaluacija istih. Budući da se u ovom istraživanju koristi izračun čimbenika spremnosti temeljen na sustavima za potporu odlučivanju, dimenzije su preuzele ulogu kriterija.

Glavni ciljevi izračuna čimbenika spremnosti, odnosno uvođenja industrije 4.0 navedeni u literaturi prikazani su u tablici 8.

Tablica 8 Ciljevi uvođenja Industrije 4.0

Strategija	[7][9][11][19][20][21][22][24][25][28][29][32][34][43][45][47]
Investicije i poslovni model	[7][9][10][11][14][20][24]
Povećanje kvalitete (postizanje izvrsnosti)	[18][29][34][42][43][46]
Smanjenje troškova	[10][11][12][13][14]
Smanjenje vremena izrade	[11][15][17][41]
Povećanje produktivnosti	[13][15][32]

Tako su za ovaj model definirani sljedeći ciljevi, odnosno kriteriji u prvoj fazi rada:

1. Povećanje produktivnosti
2. Povećanje kvalitete
3. Spremnost financijskog ulaganja
4. Složenost izvedbe i primjene
5. Očekivano vrijeme povrata investicije

Dimenzije (kriteriji) koje su se do sada pojavljivale u literaturi prikazane su u tablici 9.

Tablica 9 Pojavljivanje pojedinih dimenzija (kriterija) u literaturi

Dimenzija	Izvor
Automatizacija i digitalizacija proizvodnog procesa	[7][8][9][10][11][12][14][15][16][18][19][20][21][22][27][31][32][34][39][40][42][46][47][61][62][63][64][65]
Pametna tvornica	[7][9][10][11][12][14][15][16][18][20][21][26][31][32][39][47][48][51][52]
Korištenje podataka iz baza - Big Data Analytics	[7][10][11][12][15][16][18][19][20][35][38][40][42][47]
Povezanost s vanjskim subjektima lanca vrijednosti	[7][10][12][14][20][22][24][30][31][32][37][38][34][39][41][43][45]
Organizacija	[7][9][10][19][21][22][25][27][32][34][39][47]
IT povezanost/Internet infrastruktura	[7][9][10][11][12][14][17][20][28][35][36][44]
Pametni proizvodi	[7][10][19][21][22][26][28][31][34][36][45][47]
Tehnologije	[22][25][26][28][31][34][36][39][40][42][43]
Cyber sigurnost	[7][9][10][11][12][16][18][19][34][40][42]
Cloud Computing	[7][9][10][11][12][14][15][18][24]
Edukacija radnika i cjeloživotno učenje	[7][8][9][10][11][12][14][19][27][34][46]
Razmjena podataka u stvarnom vremenu	[7][8][9][10][19][20][21][27][42][47]
Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu	[7][10][11][12][18][28][36][44][53]
Simulacije/Digitalni blizanač/Proširena stvarnost	[7][10][11][12][14][15][16][34][45]
Umjetna inteligencija/Kibernetički sustavi/M2M	[11][12][14][15][16][18][20][31][38]
Prediktivna analitika/Napredna analiza podataka	[7][10][11][14][15][16][24][30]
Horizontalna integracija	[8][10][11][14][16][36][38][44]
Logistika 4.0	[11][18][19][26][27][32][33][43]
Digitalna kultura	[10][14][19][22][27][40][46]
Vertikalna integracija	[7][9][13][15][36][38][44]
Korištenje naprednih tehnologija + aditivna proizvodnja	[12][14][15][16][18]
Pametno planiranje i upravljanje proizvodnjom	[11][16][18][43][47]
Motivacija	[10][17][24][46]
Inovativnost	[10][12][26][34]
Odlučivanje	[11][14][28][38]
Samoptimizacija sustava	[11][19][44]
Energetska efikasnost i održivost	[14][15][18]
Fleksibilnost sustava	[11][15][34]
ERP sustavi i napredni informacijski sustavi	[37][38][40]
PLM	[8][24]

Dimenzija	Izvor
Prediktivno održavanje	[15][42]
Decentralizacija	[18][28]
Obnovljivi izvori energije	[18]
Proizvod prilagođen kupcu - Mass customization	[26]
Kontinuirano unapređenje (lean, kaizen)	[27]

Prilagodbom dimenzija području projektiranja tehnoloških procesa i idealnom modelu opisanom u poglavlju 4, formirano je stablo kriterija koji se sastoji od tri glavne grupe kriterija: „Inteligentno projektiranje tehnoloških procesa (PPTP)“, „Infrastruktura“ i „Organizacija i ljudski resursi“. Unutar svake grupe definirani su potkriteriji, a njihov prikaz da je u tablici 10.

Tablica 10 Stablo kriterija za izračun čimbenika spremnosti usmjerenog na PTP

Pametno projektiranje tehnoloških procesa – PPTP – GRUPA 1
CAD
CAM
<i>Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda</i>
<i>Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija</i>
<i>Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.</i>
<i>Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade</i>
<i>Optimizacija iskoristivosti alata</i>
<i>Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva</i>
<i>Automatska definicija plana izrade</i>
<i>Standardizacija aktivnosti projektiranja</i>
<i>Minimizacija subjektivnosti tehnologa</i>
<i>Kontinuirano praćenje, optimizacija sustava i uvođenje novih tehnoloških trendova</i>
Infrastruktura - GRUPA 2
<i>Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu u baze</i>
<i>Arhiviranje svih podataka iz svakog plana izrade u baze</i>
<i>Korištenje podataka iz baze pri definiciji novog plana izrade</i>
<i>Korištenje metoda prediktivne analitike</i>
<i>Povezanost s vanjskim bazama podataka</i>
<i>Manipulacija velikom količinom podataka (Big Data Manipulation)</i>
<i>Vrhunska računalna infrastruktura</i>
<i>Fleksibilna i modularna hardverska rješenja</i>
<i>Fleksibilna i modularna softverska rješenja</i>
<i>Vrhunska internetska infrastruktura dostupna svima</i>
<i>Cloud Computing - odvijanje obrade podataka online</i>
<i>ERP sustavi</i>
<i>Visoka sigurnost mreže i podataka</i>

<i>Prediktivno održavanje hardvera i softvera</i>
Organizacija i ljudski resursi – GRUPA 3
<i>Vrhunska povezanost sa svima u lancu vrijednosti</i>
<i>Posebni i visokoučinkoviti komunikacijski kanali (društvene mreže)</i>
<i>Decentralizacija odjela i tvrtke</i>
<i>Visoka motivacija svakog radnika</i>
<i>Spremnost radnika na promjene</i>
<i>Visoka inovativnost radnika</i>
<i>Prihvatanje principa cjeloživotnog učenja</i>
<i>Prihvatanje principa kontinuiranog unapređenja (lean, kaizen)</i>
<i>Horizontalna i vertikalna integracija</i>

7.2. Model uvođenja Industrije 4.0 usmjeren na projektiranje tehnoloških procesa

Cilj modela uvođenja Industrije 4.0 jest dobiti prioritete pojedinih njenih elemenata za uvođenje u određenu tvrtku uz navedene ciljeve koje njihovom implementacijom žele postići, a koje navode kao ulazni podatak. U formiranju modela sudjelovala je ekspertna grupa od 30 sudionika, od kojih je 15 iz privrede, a 15 iz znanosti te je svima projektiranje tehnoloških procesa primarno područje interesa. Oni su zamoljeni da prema pet kriterija cilja ocjene pojedini element na skali od 1 do 9, a opis obrade rezultata dan je u poglavlju 6. Budući je opći model uvođenja za rangiranje elemenata I40 objašnjen također u poglavlju 7 i dan izrazom (2), u daljnjem dijelu dat će se samo ponderi modela uvođenja industrije 4.0 usmjerenog na PTP. Ponderi će radi preglednosti biti prikazani u zajedničkoj tablici. Detaljniji pregled rangiranih elemenata I40 u ovisnosti o kriterijima cilja i modelu s uključenom sumom rangova, aritmetičkom sredinom i standardnom devijacijom nalazi se u prilogu 4.

Tablica 11 Rangovi elemenata modela uvođenja "pametnog projektiranja tehnoloških procesa" u ovisnosti o kriterijima cilja

Element Industrije 4.0	Povećanje produktivnosti		Povećanje kvalitete proizvoda		Spremnost financijskog ulaganja		Složenost izvedbe i primjene		Očekivano vrijeme povrata investicije	
	Rang	Ponder	Rang	Ponder	Rang	Ponder	Rang	Ponder	Rang	Ponder
CAD	8,4667	0,1085	8,0167	0,1028	8,5333	0,1094	7,7500	0,0994	7,1000	0,091
CAM	8,1667	0,1047	8,3333	0,1068	7,7667	0,0996	7,9333	0,1017	6,4333	0,0825
Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda	5,9500	0,0763	6,3667	0,0816	4,9333	0,0632	4,2667	0,0547	5,7333	0,0735
Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija	6,8333	0,0876	6,2000	0,0795	5,3667	0,0688	6,0500	0,0776	5,5167	0,0707
Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.	6,5833	0,0844	5,5667	0,0714	6,6167	0,0848	5,4833	0,0703	5,7167	0,0733
Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade	7,2833	0,0934	6,0500	0,0776	6,8833	0,0882	6,5667	0,0842	6,2667	0,0803
Optimizacija iskoristivosti alata	5,9000	0,0756	6,6000	0,0846	4,7333	0,0607	6,7333	0,0863	7,1667	0,0919
Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva	6,3000	0,0808	4,8167	0,0618	7,0333	0,0902	7,3000	0,0936	6,1667	0,0791
Automatska definicija plana izrade	4,7833	0,0613	5,8833	0,0754	6,8667	0,088	6,1000	0,0782	6,3500	0,0814
Standardizacija aktivnosti projektiranja	5,8500	0,0750	6,6333	0,085	6,8167	0,0874	6,7667	0,0868	6,7833	0,087
Minimizacija subjektivnosti tehnologa	4,4167	0,0566	6,4167	0,0823	4,9500	0,0635	6,8500	0,0878	7,6500	0,0981
Kontinuirano praćenje, optimizacija sustava i uvođenje novih tehnoloških trendova	7,4667	0,0957	7,1167	0,0912	7,5000	0,0962	6,2000	0,0795	7,1167	0,0912
Σ	78	1	78	1	78	1	78	1	78	1

Tablica 12 Rangovi elemenata modela uvođenja "infrastrukture" u ovisnosti o kriterijima cilja za uvođenje I40

Element Industrije 4.0	Povećanje produktivnosti		Povećanje kvalitete proizvoda		Spremnost financijskog ulaganja		Složenost izvedbe i primjene		Očekivano vrijeme povrata investicije	
	Rang	Ponder	Rang	Ponder	Rang	Ponder	Rang	Ponder	Rang	Ponder
Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu u baze	9,0167	0,0859	8,1167	0,0773	8,4333	0,0803	7,9667	0,0759	7,8000	0,0743
Arhiviranje svih podataka iz svakog plana izrade u baze	8,1833	0,0779	8,3333	0,0794	8,1500	0,0776	8,6833	0,0827	8,1667	0,0778
Korištenje podataka iz baze pri definiciji novog plana izrade	6,8667	0,0654	7,7667	0,0740	8,2667	0,0787	7,6667	0,0730	7,4000	0,0705
Korištenje metoda prediktivne analitike	9,3500	0,0890	8,6167	0,0821	6,9167	0,0659	7,0500	0,0671	7,6833	0,0732
Povezanost s vanjskim bazama podataka	5,9833	0,0570	6,9667	0,0663	6,9000	0,0657	7,5167	0,0716	6,3333	0,0603
Manipulacija velikom količinom podataka (Big Data Manipulation)	6,4500	0,0614	9,2167	0,0878	6,1167	0,0583	5,9000	0,0562	7,6500	0,0729
Vrhunska računalna infrastruktura	8,0167	0,0763	6,8167	0,0649	7,7167	0,0735	6,8500	0,0652	6,2500	0,0595
Fleksibilna i modularna hardverska rješenja	7,6333	0,0727	8,1833	0,0779	7,4833	0,0713	7,0167	0,0668	7,3667	0,0702
Fleksibilna i modularna softverska rješenja	9,0833	0,0865	7,9167	0,0754	8,2667	0,0787	7,7833	0,0741	7,2500	0,0690
Vrhunska internetska infrastruktura dostupna svima	8,4500	0,0805	6,9500	0,0662	8,2000	0,0781	8,4000	0,0800	7,4333	0,0708
Cloud Computing - odvijanje obrade podataka online	6,9833	0,0665	6,4833	0,0617	8,0333	0,0765	7,8333	0,0746	7,3833	0,0703
ERP sustavi	6,4167	0,0611	6,4167	0,0611	6,1167	0,0583	7,3167	0,0697	8,3500	0,0795
Visoka sigurnost mreže i podataka	6,7667	0,0644	6,1833	0,0589	6,3833	0,0608	7,4833	0,0713	8,3500	0,0795
Prediktivno održavanje hardvera i softvera	5,8000	0,0552	7,0333	0,0670	8,0167	0,0763	7,5333	0,0717	7,5833	0,0722
Σ	105	1	105	1	105	1	105	1	105	1

Tablica 13 Rangovi elemenata modela uvođenja "organizacije i ljudskih resursa" u ovisnosti o kriterijima cilja za uvođenje I40

	Povećanje produktivnosti		Povećanje kvalitete proizvoda		Spremnost financijskog ulaganja		Složenost izvedbe i primjene		Očekivano vrijeme povrata investicije	
Element Industrije 4.0	Rang	Ponder	Rang	Ponder	Rang	Ponder	Rang	Ponder	Rang	Ponder
Vrhunska povezanost sa svima u lancu vrijednosti	4,7000	0,1044	4,4833	0,0996	5,1000	0,1133	4,5667	0,1015	4,2167	0,0937
Posebni i visokoučinkoviti komunikacijski kanali (društvene mreže)	2,9833	0,0663	3,3833	0,0752	4,1667	0,0926	6,6167	0,1470	5,5833	0,1241
Decentralizacija odjela i tvrtke	2,9833	0,0663	2,7500	0,0611	3,6167	0,0804	5,1167	0,1137	4,8167	0,1070
Visoka motivacija svakog radnika	5,9000	0,1311	6,3833	0,1419	5,2000	0,1156	5,3000	0,1178	5,3667	0,1193
Spremnost radnika na promjene	5,7500	0,1278	5,8500	0,1300	6,3667	0,1415	4,0167	0,0893	5,2333	0,1163
Visoka inovativnost radnika	6,0833	0,1352	5,7833	0,1285	5,3167	0,1181	4,1500	0,0922	5,2500	0,1167
Prihvatanje principa cjeloživotnog učenja	6,1500	0,1367	5,6833	0,1263	5,6167	0,1248	5,0833	0,1130	5,3833	0,1196
Prihvatanje principa kontinuiranog unapređenja (lean, kaizen)	5,6000	0,1244	6,3667	0,1415	5,3500	0,1189	5,2500	0,1167	4,9667	0,1104
Horizontalna i vertikalna integracija	4,8500	0,1078	4,3167	0,0959	4,2667	0,0948	4,9000	0,1089	4,1833	0,0930
Σ	45	1	45	1	45	1	45	1	45	1

7.3. Verifikacija modela uvođenja Industrije 4.0 usmjerenog na PTP

Verifikacija modela provest će se analizom osjetljivosti i simulacijom rada modela uvođenja. Analizom osjetljivosti promatrat će se kako je model uvođenja (rang lista elemenata Industrije 4.0) osjetljiv na promjenu pojedinih kriterija. Provest će se u programu *Expert Choice 11* koji služi kao alat za provedbu AHP metode.

Simulacija rada modela provest će u istom programu i to za četiri različite tvrtke te će se tako pokazati kako se mijenja rang lista elemenata u odnosu na matricu vektora prioriteta tvrtke, odnosno iz nje izračunat vektor prioriteta tvrtke.

7.3.1. Analiza osjetljivosti modela uvođenja Industrije 4.0 usmjernog na PTP

Program *Expert Choice 11* sadrži modul za ispitivanje osjetljivosti modela s pet mogućih opcija testiranja osjetljivosti. Zbog velikog broja elemenata, u doktorskom radu koristit će se samo ove tri opcije testiranja osjetljivosti:

Performanse. Radi se o opciji koja prikazuje prioritete elemenata te ih stavlja u odnos s težinama pojedinih objekata i/ili svim objektima zajedno. Pomicanjem kriterija, pomiče se njegova važnost (smanjuje se važnost drugih kriterija) te se dobivaju različiti rezultati, odnosno redoslijed elemenata Industrije 4.0.

Dinamički način. Ovom je opcijom moguće je vidjeti kako se dinamički mijenjaju prioritete elemenata ako se mijenjaju težine pojedinih kriterija. Ova opcija analize osjetljivosti ima i opciju komponente (eng. *Components*) u kojoj je moguće vidjeti udjele težina pojedinih kriterija u ukupnom prioritetu elemenata Industrije 4.0. Također je moguće dinamičko mijenjanje redoslijeda elemenata jednostavnim pomicanjem prioriteta kriterija.

Gradijent. Daje uvid u prioritete elementa u odnosu na težinu jednog kriterija. Omogućuje analizu osjetljivosti prioriteta elemenata na promjene težina pojedinih kriterija. Vertikalna crvena linija prikazuje težinu kriterija dobivenu nakon usporedbe prema Saatyjevoj skali, dok isprekidana plava linija prikazuje trenutno odabranu težinu kriterija ako je ona odabrana.

Detaljna analiza osjetljivosti s komentarima prikazat i opisat će se samo za model uvođenja pametnog projektiranja tehnološkog procesa, dok će se zbog obima rada za "infrastrukturu" i "organizaciju i ljudske resurse" u Prilogu 5 dati slike (grafovi) osjetljivosti.

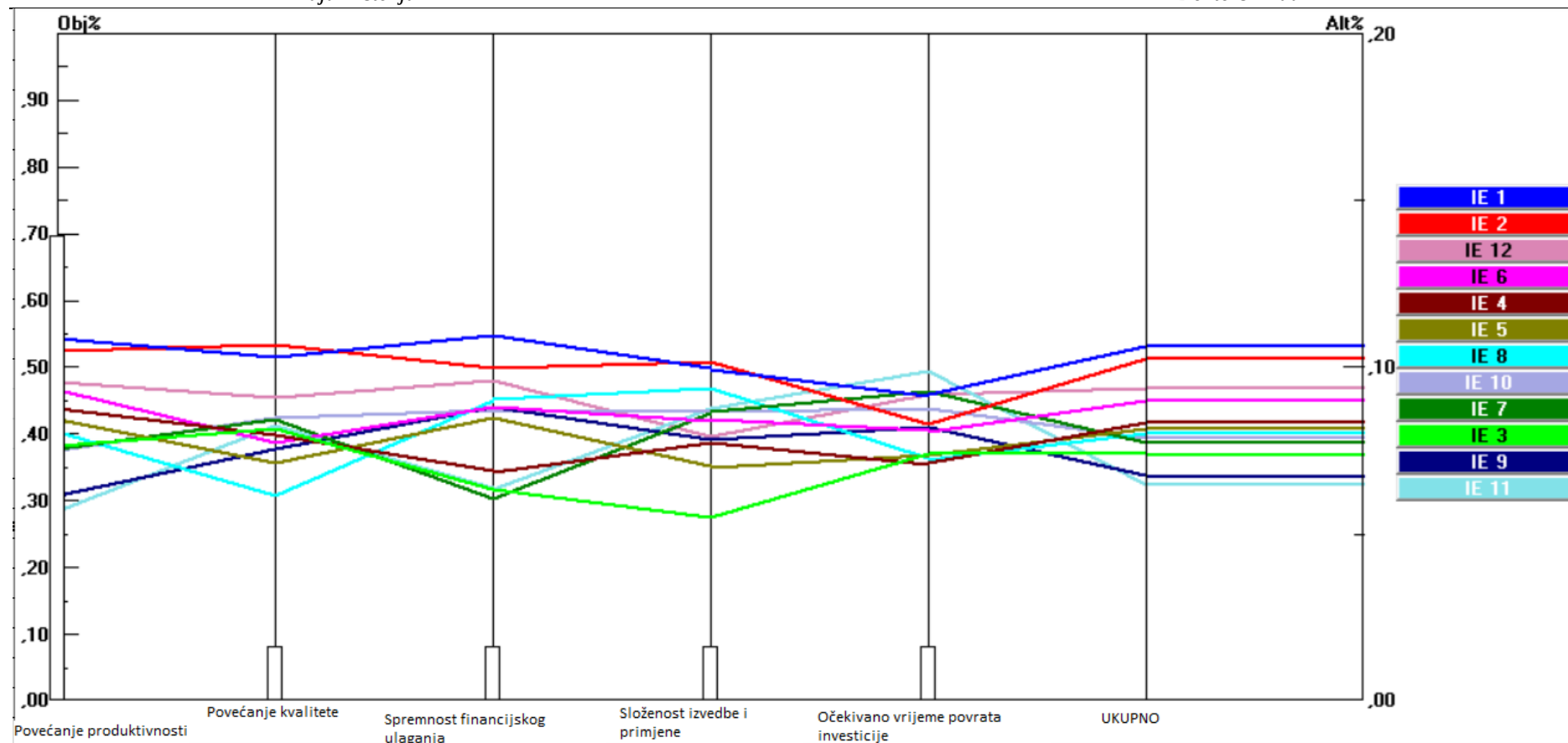
Na slikama u nastavku prikazano je sljedeće:

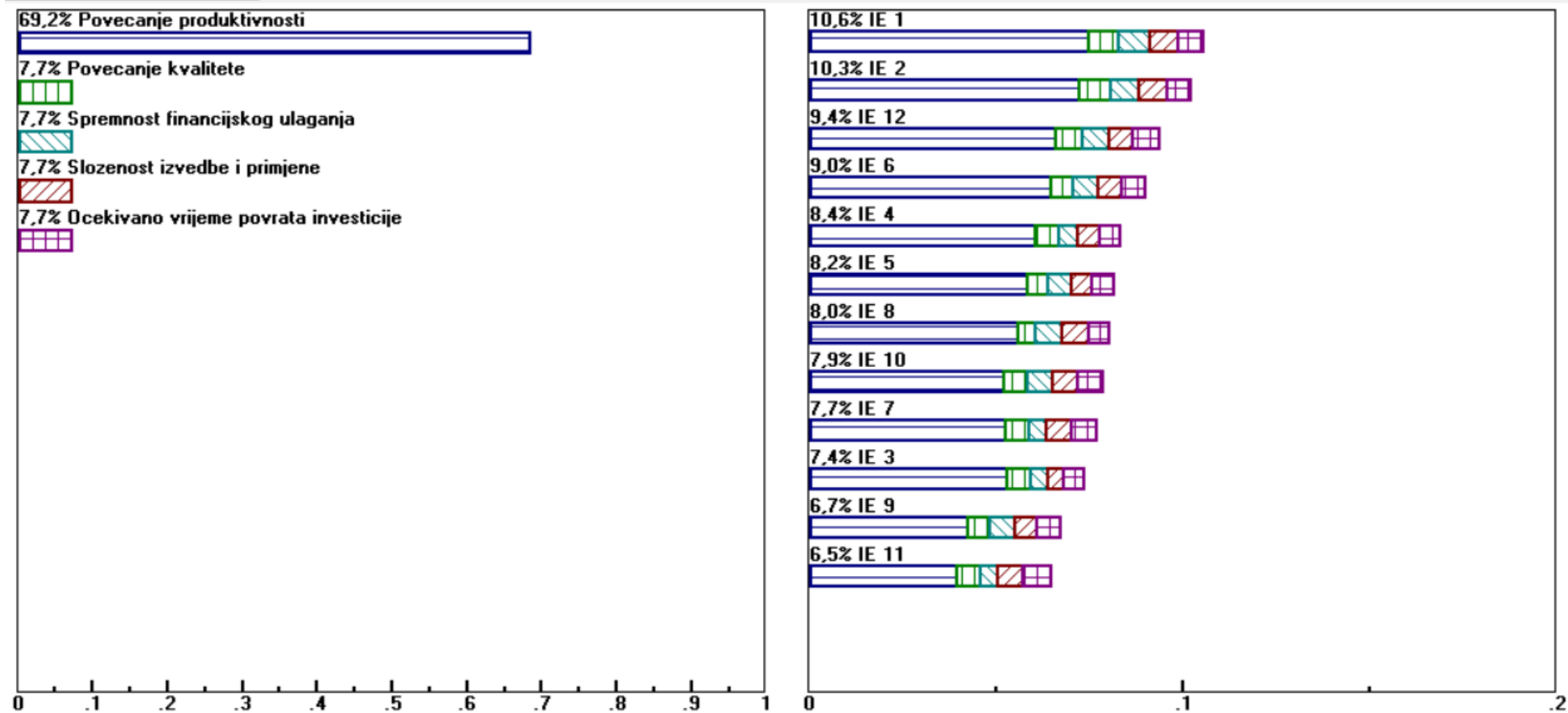
- Slika 43 prikazuje opciju *Performance* testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a
- Slika 44 prikazuje opciju *Dynamic* testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a

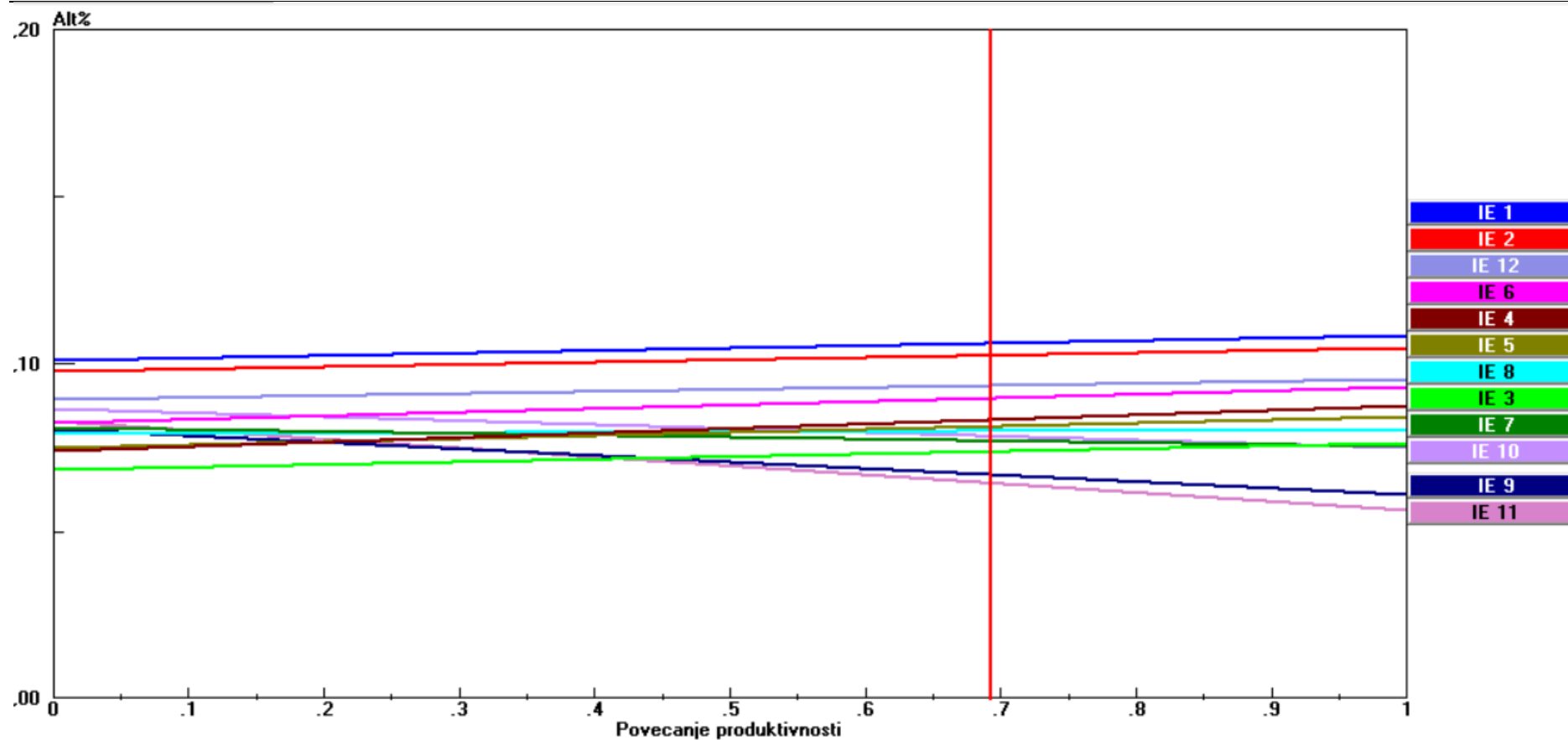
- Slika 45 prikazuje opciju *Gradient* testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a po kriteriju povećanja produktivnosti
- Slika 46 prikazuje opciju *Gradient* testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a po kriteriju spremnosti financijskog ulaganja
- Slika 47 prikazuje opciju *Gradient* testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a po kriteriju složenosti izvedbe i primjene
- Slika 48 prikazuje opciju *Gradient* testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a po kriteriju očekivanog vremena povrata investicije
- Slika 49 prikazuje opciju *Gradient* testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a po kriteriju povećanja kvalitete

Zbog jednostavnosti prikaza uvedena je oznaka *IE-x*, koja predstavlja pojedini element Industrije 4.0 prema sljedećem redoslijedu:

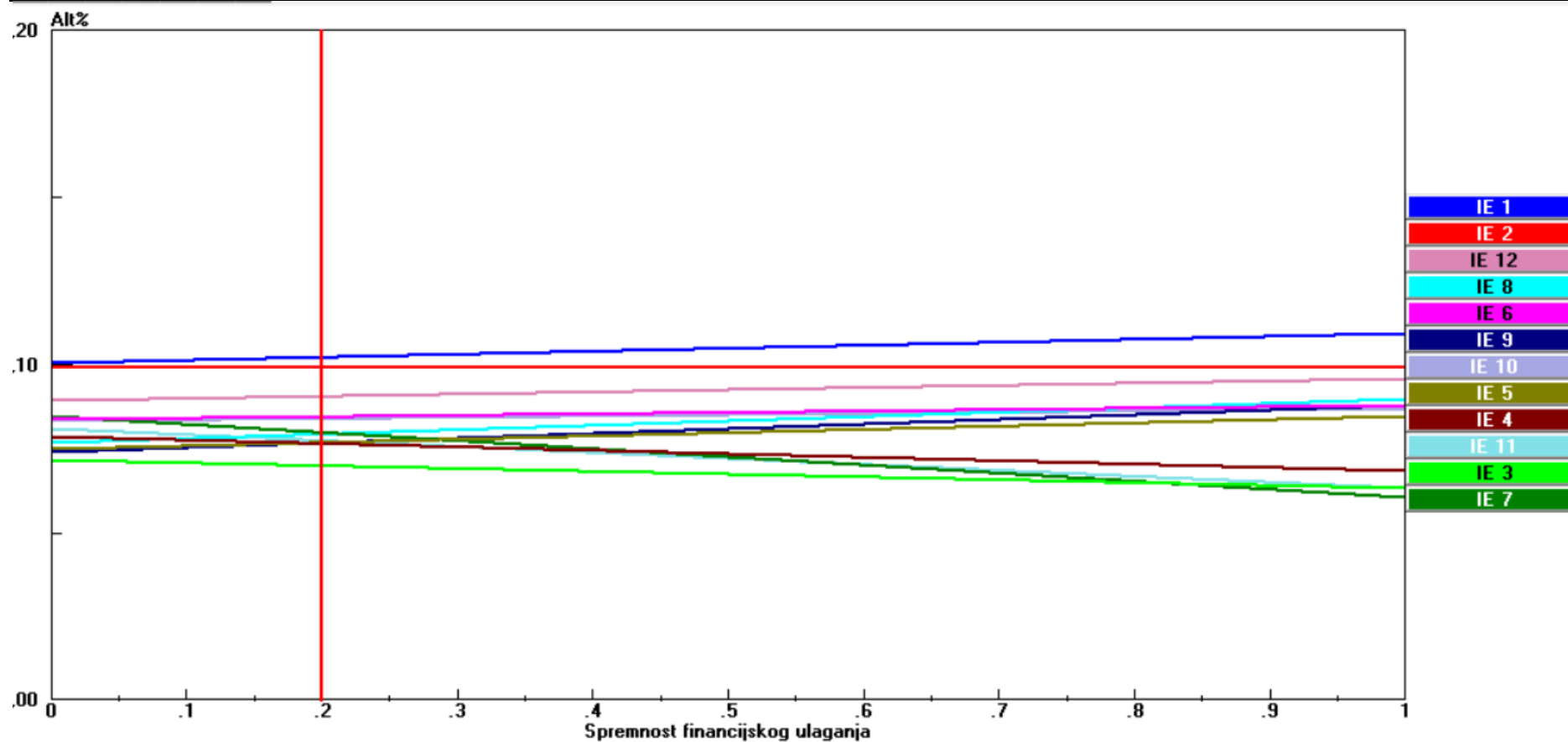
Oznaka IE-	Element
1	CAD
2	CAM
3	Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda
4	Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija
5	Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.
6	Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade
7	Optimizacija iskoristivosti alata
8	Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva
9	Automatska definicija plana izrade
10	Standardizacija aktivnosti projektiranja
11	Minimizacija subjektivnosti tehnologa
12	Kontinuirano praćenje, optimizacija sustava i uvođenje novih tehnoloških trendova

Slika 43 Opcija *Performance* testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a

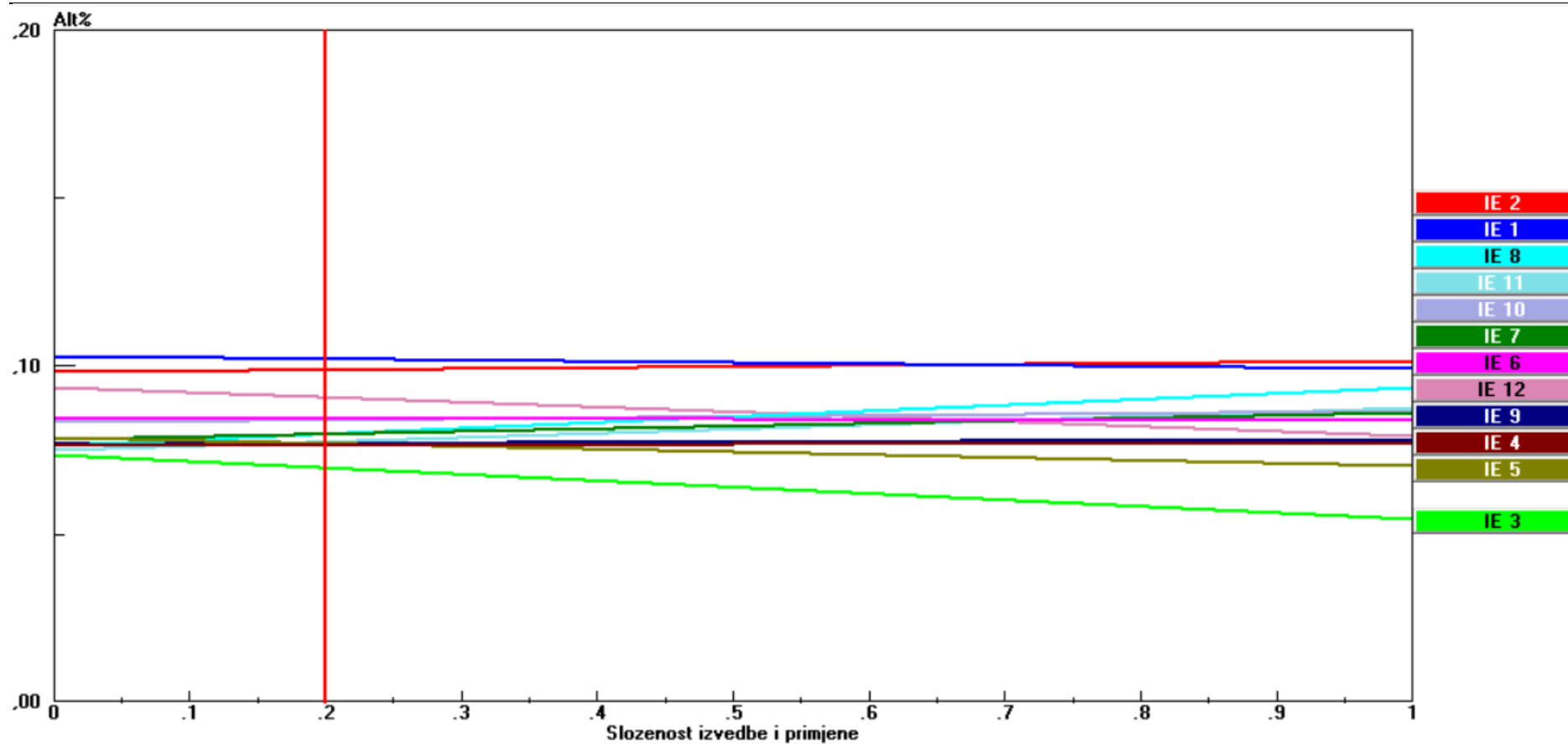
Slika 44 Opcija *Dynamic* testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a

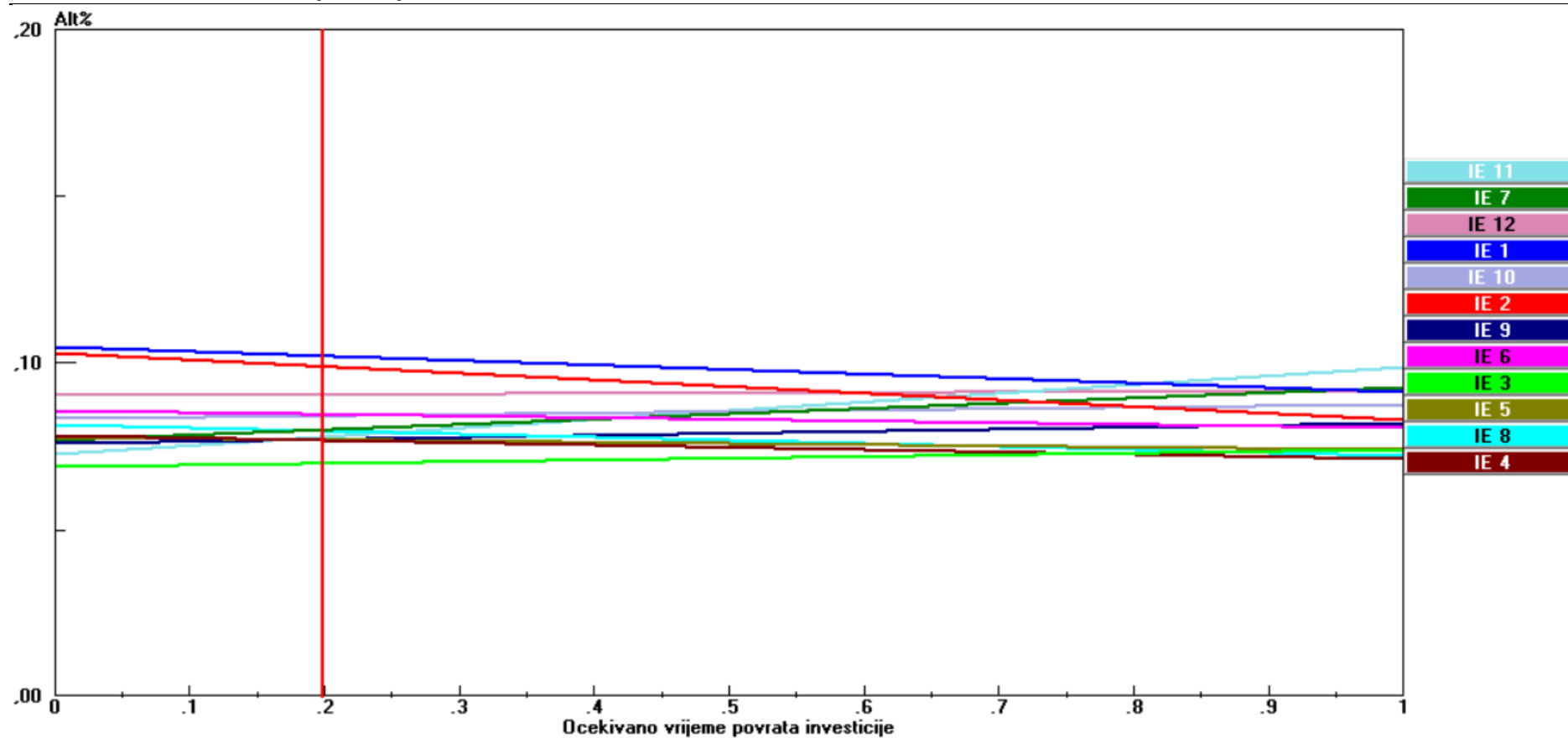


Slika 45 Opcija *Gradient* testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a po kriteriju povećanja produktivnosti

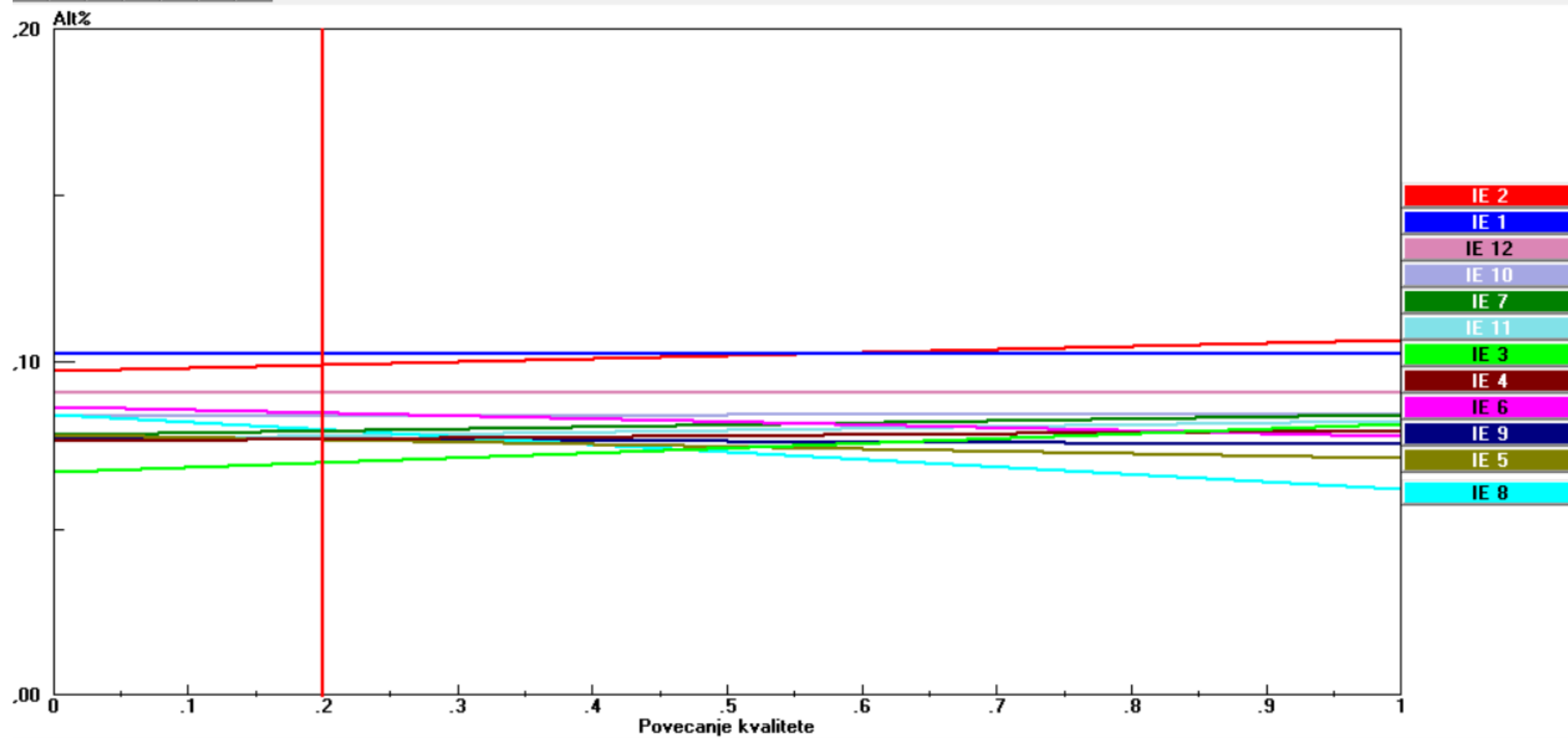


Slika 46 Opcija *Gradient* testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a po kriteriju spremnosti finansijskog ulaganja

Slika 47 Opcija *Gradient* testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a po kriteriju složenosti izvedbe i primjene



Slika 48 Opcija Gradient testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a po kriteriju očekivanog vremena povrata investicije



Slika 49 Opcija Gradient testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a po kriteriju povećanja kvalitete

Slika 43 koja prikazuje opciju *performance* testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a pokazuje kako su elementi Industrije 4.0 rangirani prema pojedinim kriterijima i ukupni redoslijed prema trenutno odabranom vektoru prioriteta tvrtke. Zanimljivost prikaza je da pokazuje kako se redoslijed elemenata mijenja prema pojedinim kriterijima. Jednostavnim pomicanjem kriterija pomiče se njegova važnost (smanjuje se važnost drugih kriterija) te se dobivaju različiti rezultati, odnosno redoslijed elemenata Industrije 4.0.

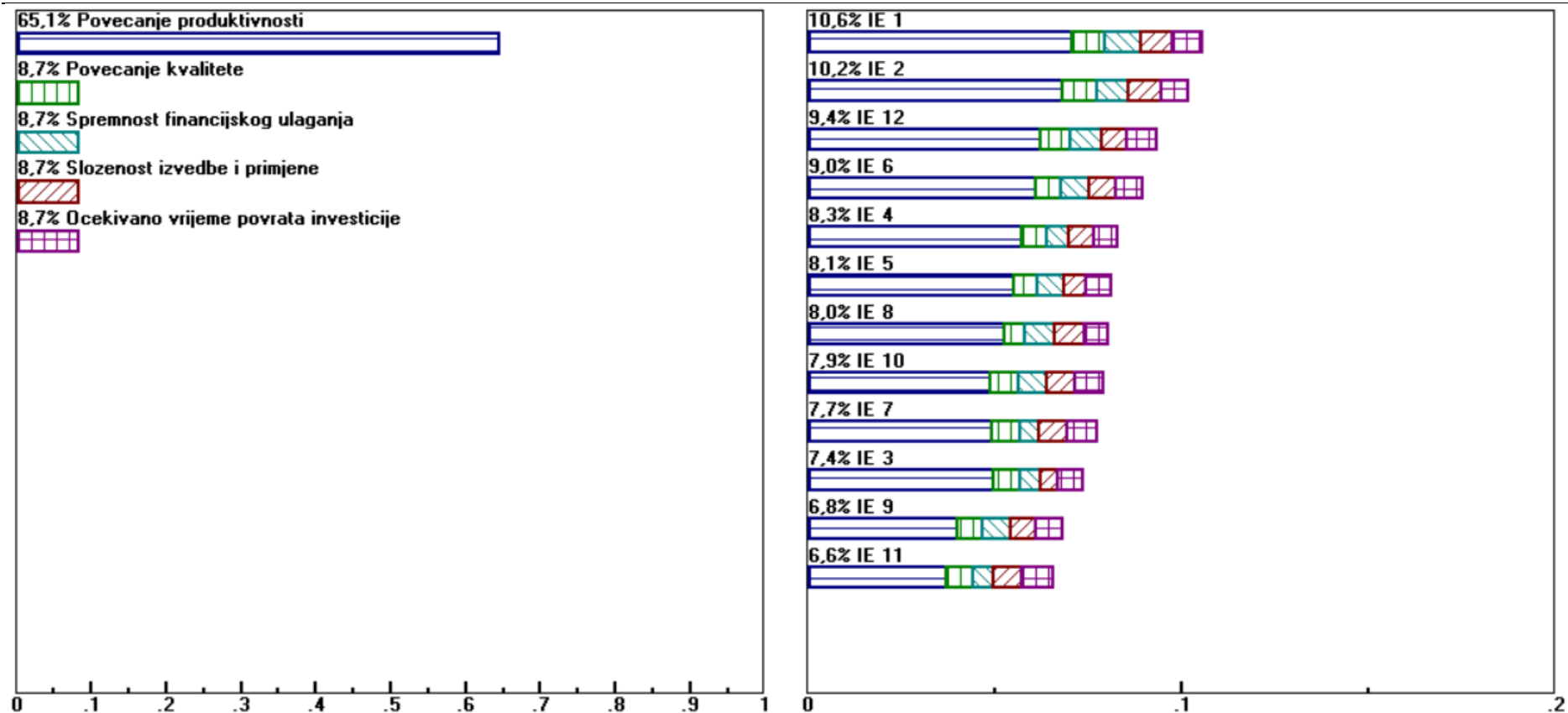
Slika 44 prikazuje opciju *dynamic* testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a s uključenom opcijom *components* zbog čega je vidljivo koliko pojedini kriteriji utječu na ukupni iznos prioriteta pojedinog elementa. Elementi su rangirani prema ukupnom prioritetu (opcija *sort*). Ovo se lako može promijeniti jednostavnim pomicanjem kriterija (povećavanje ili smanjivanje njegovog prioriteta) što utječe na iznos vektora prioriteta tvrtke.

Slike od 45 do 49 prikazuju opciju *gradient* testiranja osjetljivosti modela uvođenja PTP-a prema odabranim kriterijima. Na njima je vidljivo kako se pojedina rang lista elemenata mijenja s porastom važnosti odabranog kriterija. Analiza osjetljivosti služi i za provjeru je li rezultat odlučivanja, odnosno rang elemenata stabilan. S obzirom na veliki broj elemenata Industrije 4.0, model uvođenja se smatra stabilnim ako se mijenjanjem glavnih kriterija za 5% u svim kombinacijama ne pojave značajne razlike u poretku, odnosno rang listi elemenata.

Provjera stabilnosti rezultata izvršena je dinamičkom analizom osjetljivosti (opcija *dynamic*). Ako konačan rezultat ostaje isti uz variranje važnosti glavnih kriterija za 5% u svim kombinacijama, može se zaključiti da je rezultat analize stabilan. Provedbom dinamičke analize osjetljivosti i varijacijom važnosti svih kriterija ukupno za 5% u svim kombinacijama, nije došlo do značajne promjene u rangiranju elemenata Industrije 4.0 te je zaključeno da je dobiveni rezultat, odnosno model uvođenja stabilan.

Pod značajnom promjenom podrazumijeva se da je došlo do promjene redoslijeda (ranga) više od 3 elemenata i to za više pozicija u redoslijedu.

Jedna od takvih kombinacija promijene prioriteta kriterija prikazana je na slici 50. Značajne razlike u redoslijedu elemenata Industrije 4.0 nisu se pokazale ni u modelu "Infrastruktura" te "Organizacija i ljudski resursi" te se može zaključiti da su i ti modeli uvođenja stabilni. Slike jedne kombinacije s promjenom ulaznih podataka za 5 % za ostale modele nalaze se Prilogu 5.



Slika 50 Opcija dynamic testiranja osjetljivosti modela uvođenja PPTP-a nakon promjene ulaznih podataka za otprilike 5 %

7.3.2. *Simulacija rada modela uvođenja Industrije 4.0 usmjeren na PTP*

Simulacija rada modela uvođenja služi za potvrdu, odnosno verifikaciju modela uvođenja. Ukoliko ulazni podaci prate izlazne podatke, može se zaključiti da je model uvođenja uspješno verificiran, odnosno da je ispravan. Pod praćenjem ulaznih i izlaznih podataka podrazumijeva se da ako su značajniji neki od ulaznih kriterija za uvođenje Industrije 4.0, da kod izlaznih podataka (u vrhu rang liste elemenata Industrije 4.0) budu elementi koji su u vrhu pojedinih rang lista tih kriterija.

Simulacija trenutnih stanja i zahtjeva tvrtki provest će se u četiri različite kategorije. Na taj način će se pokazati kako se mijenja rang lista elemenata u odnosu na matricu vektora prioriteta tvrtke, odnosno iz nje izračunat vektor prioriteta tvrtke. Isto je ujedno i proširena analiza osjetljivosti modela uvođenja.

Ranije je pokazano da model uvođenja nije osjetljiv na promjenu ulaznih podataka za 5%, a sada će se pokazati koliko je osjetljiv na promjenu podataka veću od 5%. Poželjno je da se većom promjenom ulaznih podataka mijenja redoslijed elementa. U protivnom, kada se to ne bi događalo, model uvođenja bi bio jedinstven (isti) za sve tvrtke i vektori prioriteta tvrtke (ispunjavanje matrice vektora prioriteta tvrtke) ne bi bili potrebni.

Simulacija će se provesti korištenjem programa *Expert Choice 11*.

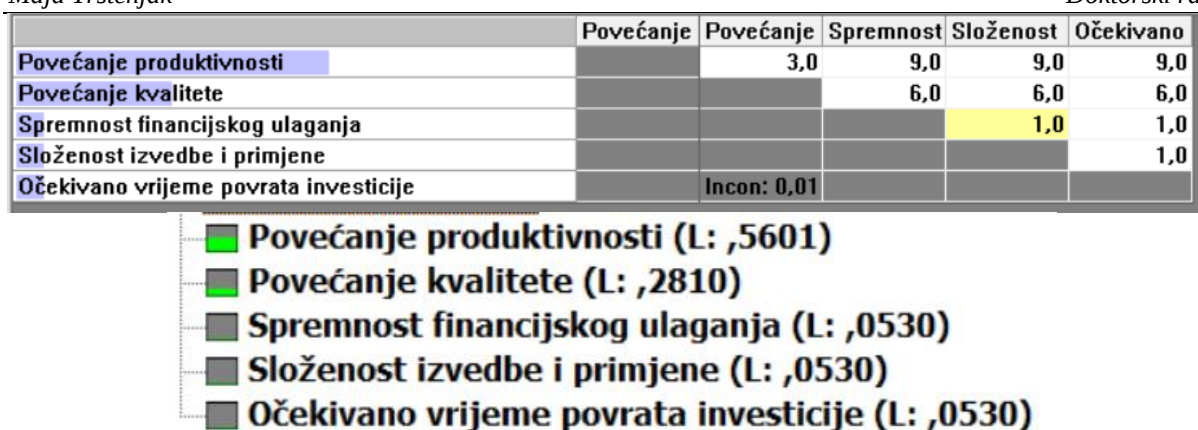
Svaka od četiri tvrtke će imati različiti vektor prioriteta tvrtke, tj. svaki od njih će preferirati različite kriterije.

Ispunjene matrice vektora prioriteta tvrtke prikazat će se iz programa *Expert Choice 11*. U njemu se ispunjava samo gornja trokutasta matrica. Ukoliko je vrijednost crne boje tada se odnosi na usporedbu lijeve strane matrice s gornjom stranom matrice, a ukoliko je vrijednost crvene boje tada se odnosi na usporedbu gornje strane matrice s lijevom stranom matrice.

Na slikama od 51 do 54 prikazane su matrice vektora prioriteta tvrtki i iznosi vektora prioriteta za promatrane tvrtke.

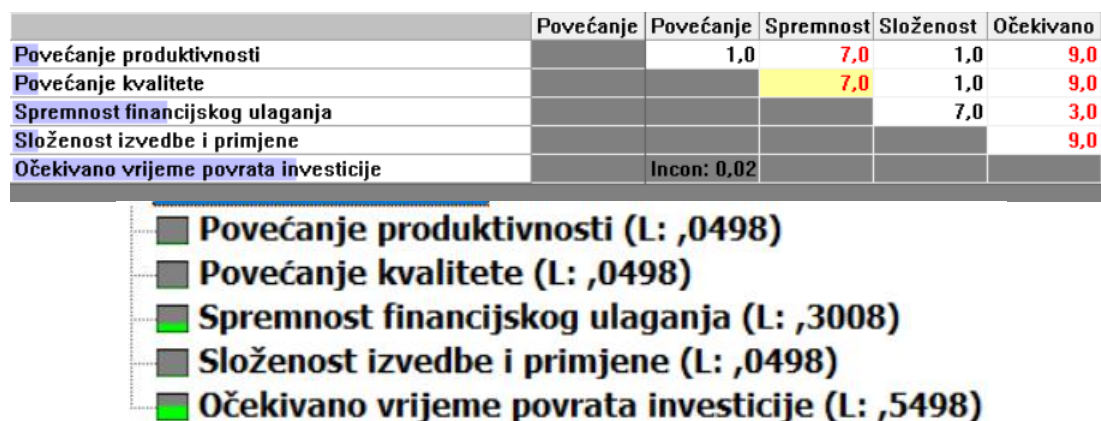
Slika 55 prikazuje polarni graf iznosa vektora prioriteta za sve četiri tvrtke istovremeno s ciljem lakšeg, vizualnog prikaza.

Tvrtka 1 tako preferira kriterij povećanja produktivnosti uvođenjem elemenata Industrije 4.0. Uz njega će se preferirati i kriterij povećanja kvalitete proizvoda, jer su oni povezani. To znači da tvrtka želi uvesti one elemente koji imaju daju najveće povećanje produktivnosti koje se istovremeno odražava i na povećanje kvalitete proizvoda nakon uvođenja.



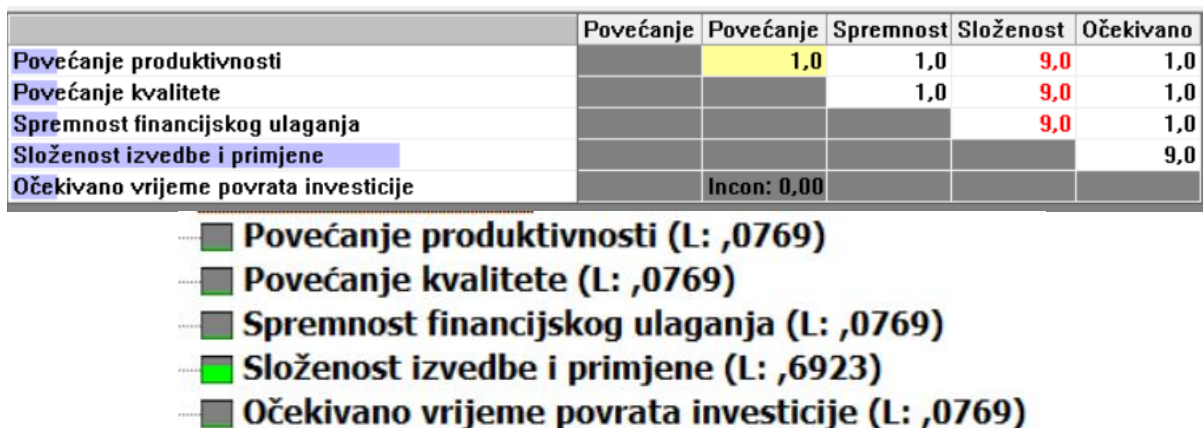
Slika 51 Matrica prioriteta za tvrtku 1

Tvrtka 2 preferira kriterij povrata investicije. Uz njega će se preferirati i kriterij spremnost finansijskog ulaganja, jer su oni usko povezani. Tvrtka želi uvesti elemente industrije 4.0 koji će rezultirati najbržim povratom investicije i najmanjim iznosom finansijskog ulaganja.



Slika 52 Matrica prioriteta za tvrtku 2

Tvrtka 3 preferira kriterij složenosti izvedbe i primjene. To znači da tvrtka želi uvesti elemente Industrije 4.0 koji imaju malu složenost izvedbe i primjene.



Slika 53 Matrica prioriteta za tvrtku 3

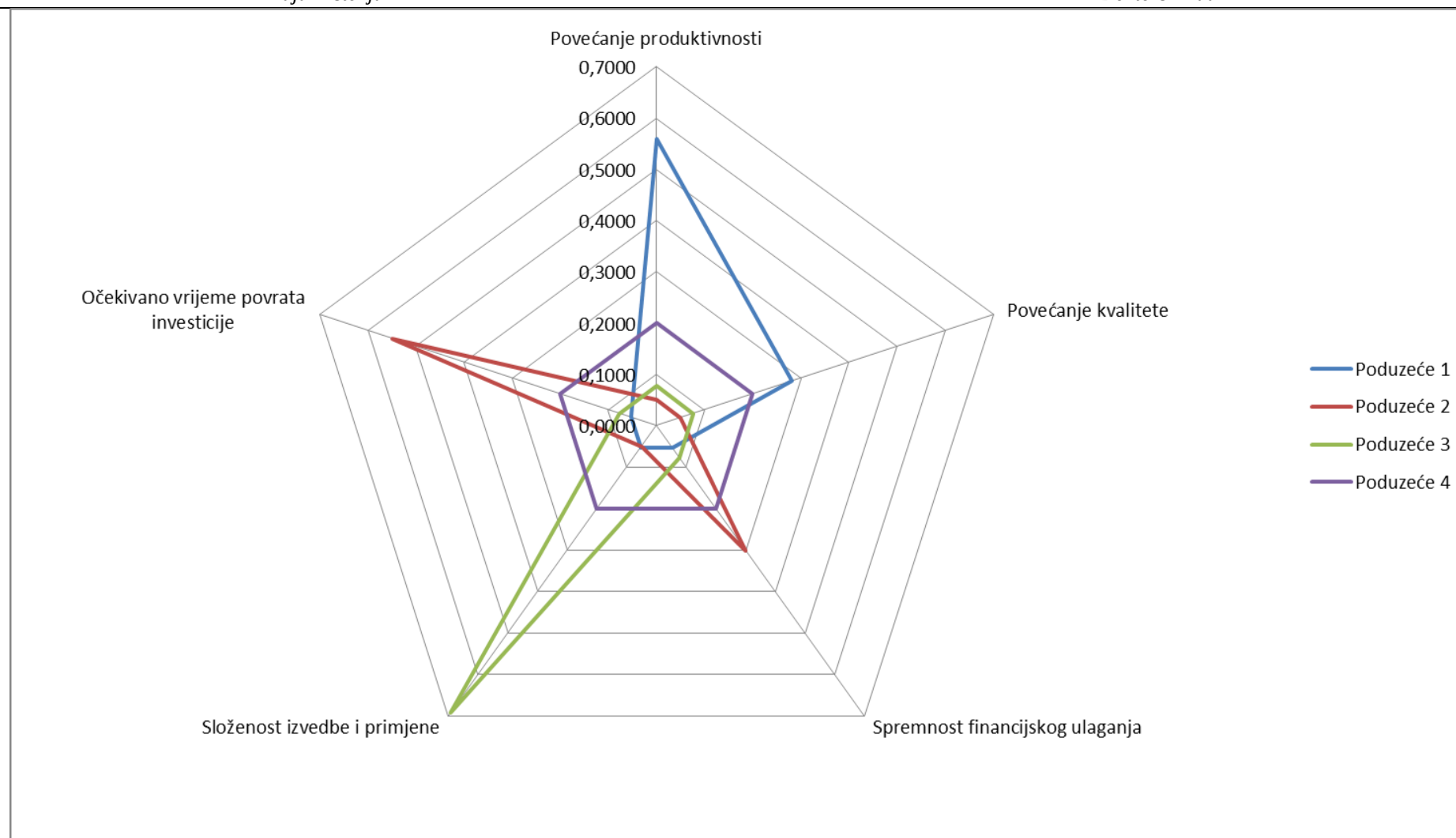
Tvrtka 4 jednako preferira sve kriterije, tako da će svi kriteriji imati jednaku važnost, odnosno ponder koji iznosi 0,25.

	Povećanje	Povećanje	Spremnost	Složenost	Očekivano
Povećanje produktivnosti		1,0	1,0	1,0	1,0
Povećanje kvalitete			1,0	1,0	1,0
Spremnost financijskog ulaganja				1,0	1,0
Složenost izvedbe i primjene					1,0
Očekivano vrijeme povrata investicije		Incon: 0,00			

Goal: IPTP

- ☐ Povećanje produktivnosti (L: ,200)
- ☐ Povećanje kvalitete (L: ,200)
- ☐ Spremnost financijskog ulaganja (L: ,200)
- ☐ Složenost izvedbe i primjene (L: ,200)
- ☐ Očekivano vrijeme povrata investicije (L: ,200)

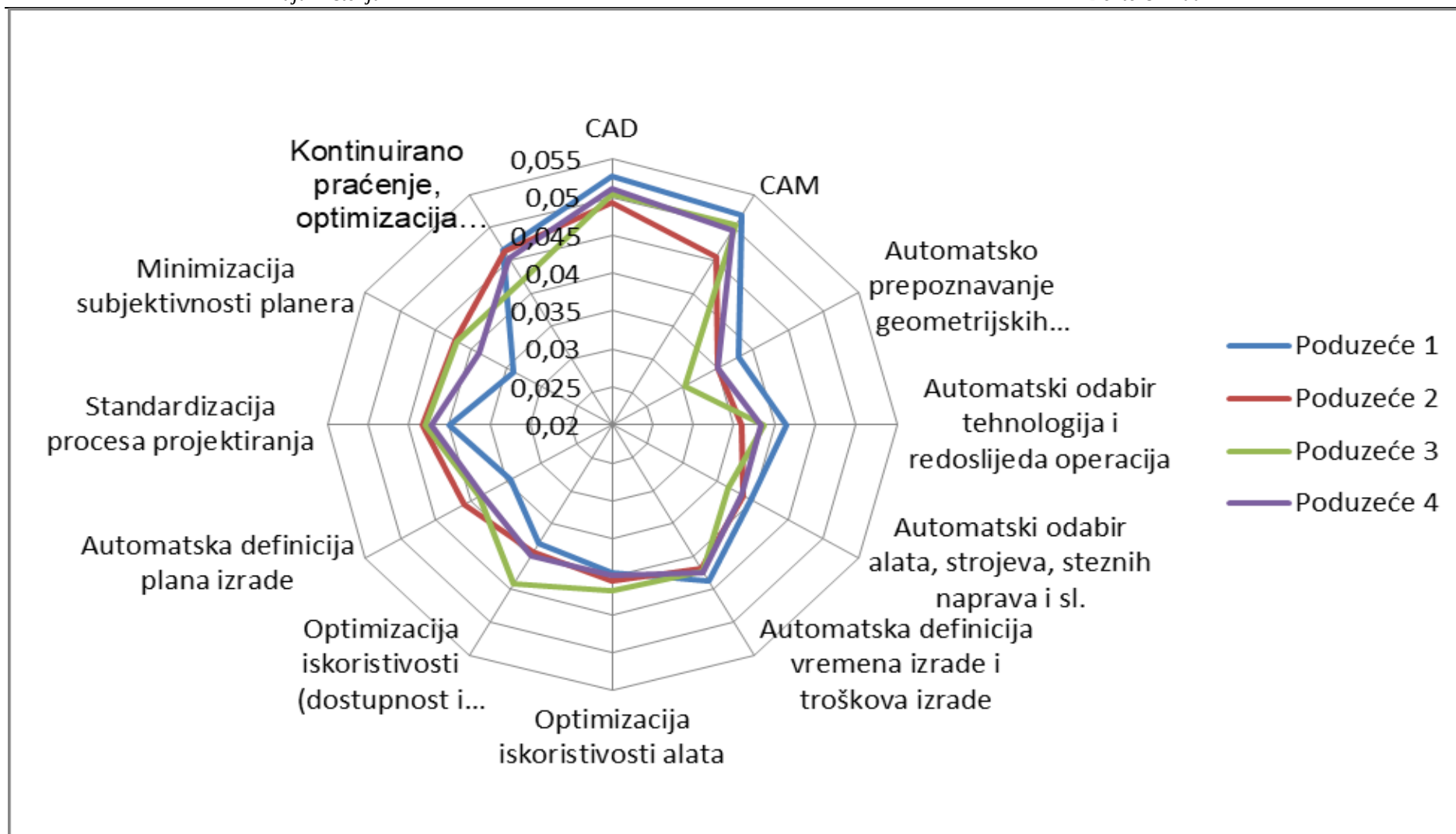
Slika 54 Matrica prioriteta za tvrtku 4



Slika 55 Polarni graf iznosa vektora prioriteta za sve 4 tvrtke

Tablica 14 Usporedba redoslijeda elemenata Industrije 4.0 modela uvođenja "pametnog projektiranja tehnoloških procesa (PPTP)" za sve četiri tvrtke

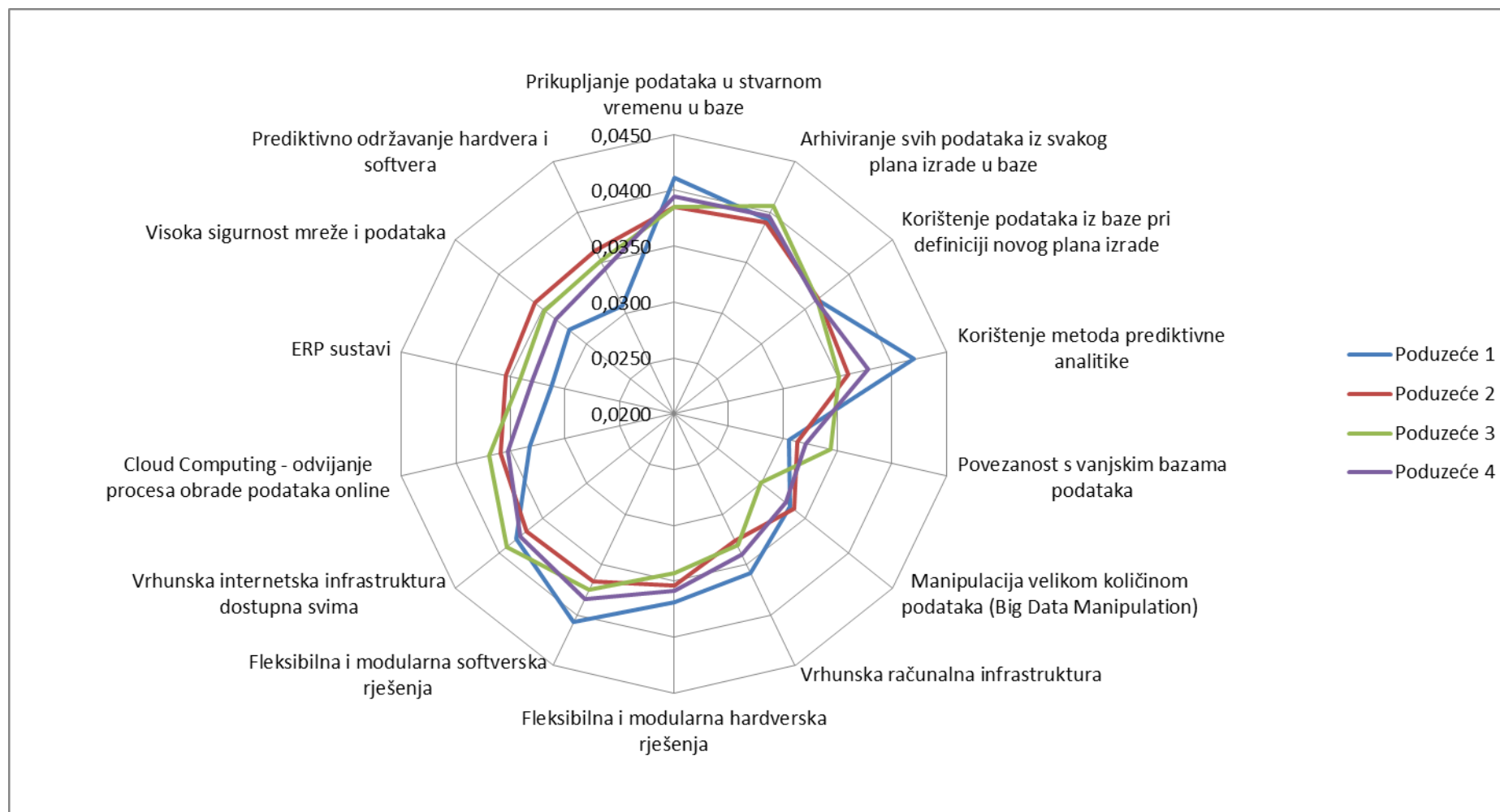
	Tvrtka 1		Tvrtka 2		Tvrtka 3		Tvrtka 4	
Rang	Element	Ponder	Element	Ponder	Element	Ponder	Element	Ponder
1	CAD	0,0528	CAD	0,0493	CAM	0,0504	CAD	0,0511
2	CAM	0,0519	Kontinuirano praćenje, optimizacija sustava i uvođenje novih tehnoloških trendova	0,0463	CAD	0,0503	CAM	0,0496
3	Kontinuirano praćenje, optimizacija sustava i uvođenje novih tehnoloških trendova	0,0467	CAM	0,0455	Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva	0,0441	Kontinuirano praćenje, optimizacija sustava i uvođenje novih tehnoloških trendova	0,0454
4	Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade	0,0438	Standardizacija aktivnosti projektiranja	0,0433	Standardizacija aktivnosti projektiranja	0,0429	Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade	0,0424
5	Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija	0,0415	Minimizacija subjektivnosti tehnologa	0,0422	Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade	0,0422	Standardizacija aktivnosti projektiranja	0,0422
6	Standardizacija aktivnosti projektiranja	0,0399	Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade	0,0418	Minimizacija subjektivnosti tehnologa	0,042	Optimizacija iskoristivosti alata	0,0399
7	Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.	0,0397	Automatska definicija plana izrade	0,041	Optimizacija iskoristivosti alata	0,0419	Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva	0,0399
8	Optimizacija iskoristivosti alata	0,0394	Optimizacija iskoristivosti alata	0,0406	Kontinuirano praćenje, optimizacija sustava i uvođenje novih tehnoloških trendova	0,0419	Minimizacija subjektivnosti tehnologa	0,0389
9	Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva	0,0381	Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva	0,0393	Automatska definicija plana izrade	0,0389	Automatska definicija plana izrade	0,0385
10	Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda	0,0379	Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.	0,0386	Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija	0,0387	Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija	0,0384
11	Automatska definicija plana izrade	0,0343	Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija	0,0359	Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.	0,0364	Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.	0,0384
12	Minimizacija subjektivnosti tehnologa	0,034	Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda	0,0351	Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda	0,0303	Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda	0,035



Slika 56 Usporedba elemenata Industrije 4.0 modela uvođenja "pametnog projektiranja tehnoloških procesa" za sve četiri tvrtke

Tablica 15 Usporedba redoslijeda elemenata Industrije 4.0 modela uvođenja "infrastrukture" za sve četiri tvrtke

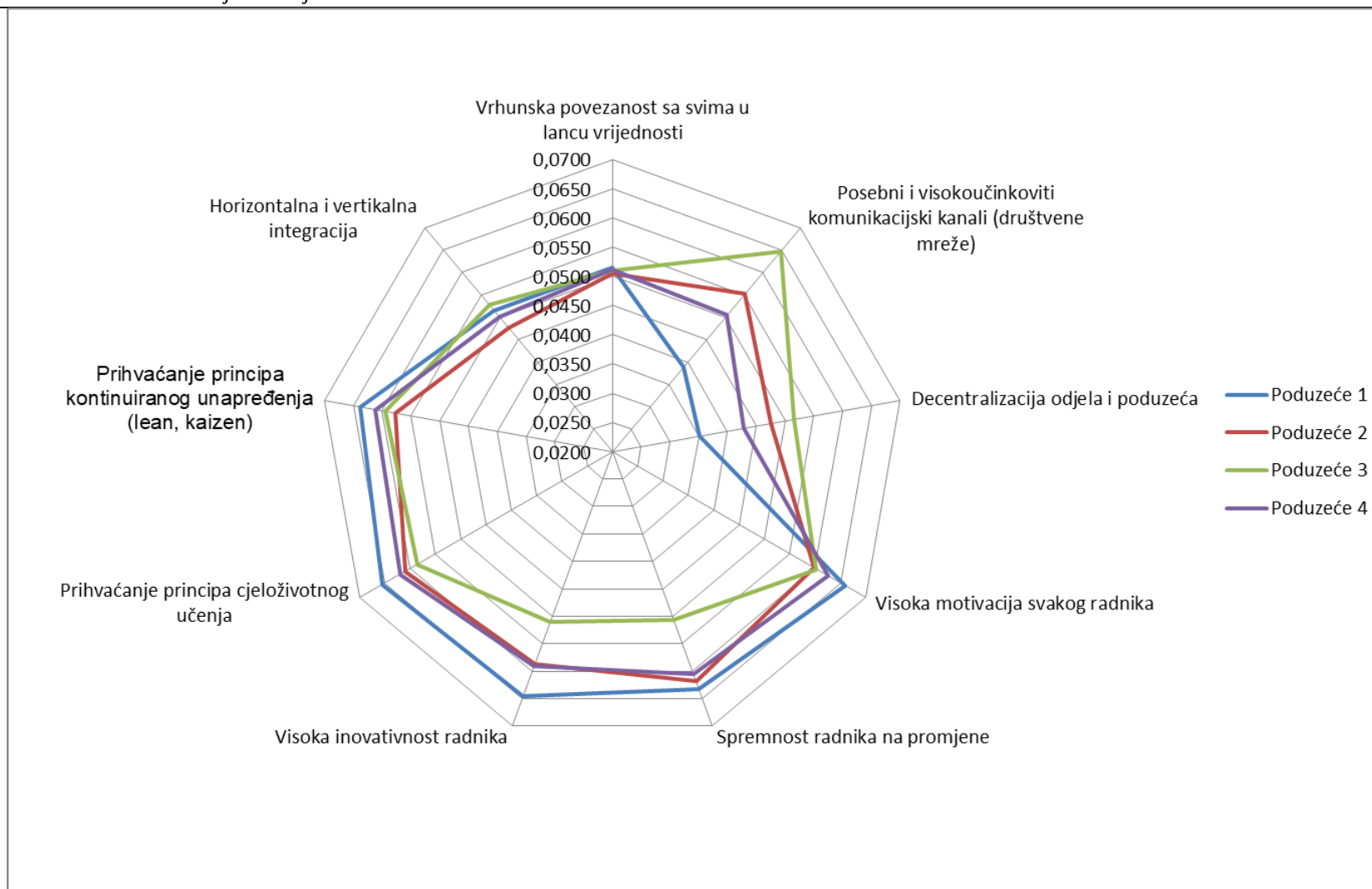
	Tvrtka 1		Tvrtka 2		Tvrtka 3		Tvrtka 4	
Rang	Element	Ponder	Element	Ponder	Element	Ponder	Element	Ponder
1	Korištenje metoda prediktivne analitike	0,0420	Arhiviranje svih podataka iz svakog plana izrade u baze	0,0390	Arhiviranje svih podataka iz svakog plana izrade u baze	0,0406	Arhiviranje svih podataka iz svakog plana izrade u baze	0,0396
2	Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu u baze	0,0411	Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu u baze	0,0385	Vrhunska internetska infrastruktura dostupna svima	0,0391	Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu u baze	0,0394
3	Fleksibilna i modularna softverska rješenja	0,0407	Vrhunska internetska infrastruktura dostupna svima	0,0369	Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu u baze	0,0385	Fleksibilna i modularna softverska rješenja	0,0384
4	Arhiviranje svih podataka iz svakog plana izrade u baze	0,0393	Fleksibilna i modularna softverska rješenja	0,0367	Fleksibilna i modularna softverska rješenja	0,0375	Korištenje metoda prediktivne analitike	0,0378
5	Vrhunska internetska infrastruktura dostupna svima	0,0380	Korištenje podataka iz baze pri definiciji novog plana izrade	0,0365	Cloud Computing - odvijanje obrade podataka online	0,0370	Vrhunska internetska infrastruktura dostupna svima	0,0376
6	Fleksibilna i modularna hardverska rješenja	0,0369	Prediktivno održavanje hardvera i softvera	0,0362	Korištenje podataka iz baze pri definiciji novog plana izrade	0,0364	Korištenje podataka iz baze pri definiciji novog plana izrade	0,0362
7	Korištenje podataka iz baze pri definiciji novog plana izrade	0,0364	Korištenje metoda prediktivne analitike	0,0360	Korištenje metoda prediktivne analitike	0,0351	Fleksibilna i modularna hardverska rješenja	0,0359
8	Vrhunska računalna infrastruktura	0,0358	Cloud Computing - odvijanje obrade podataka online	0,0359	Visoka sigurnost mreže i podataka	0,0348	Cloud Computing - odvijanje obrade podataka online	0,0352
9	Manipulacija velikom količinom podataka (Big Data Manipulation)	0,0333	Visoka sigurnost mreže i podataka	0,0359	Povezanost s vanjskim bazama podataka	0,0344	Prediktivno održavanje hardvera i softvera	0,0343
10	Cloud Computing - odvijanje obrade podataka online	0,0332	Fleksibilna i modularna hardverska rješenja	0,0354	Fleksibilna i modularna hardverska rješenja	0,0343	Vrhunska računalna infrastruktura	0,0340
11	Visoka sigurnost mreže i podataka	0,0320	ERP sustavi	0,0354	ERP sustavi	0,0341	Visoka sigurnost mreže i podataka	0,0335
12	ERP sustavi	0,0312	Manipulacija velikom količinom podataka (Big Data Manipulation)	0,0337	Vrhunska računalna infrastruktura	0,0331	ERP sustavi	0,0330
13	Prediktivno održavanje hardvera i softvera	0,0307	Vrhunska računalna infrastruktura	0,0326	Manipulacija velikom količinom podataka (Big Data Manipulation)	0,0299	Manipulacija velikom količinom podataka (Big Data Manipulation)	0,0328
14	Povezanost s vanjskim bazama podataka	0,0306	Povezanost s vanjskim bazama podataka	0,0313	Prediktivno održavanje hardvera i softvera	0,0352	Povezanost s vanjskim bazama podataka	0,0321



Slika 57 Usporedba elemenata Industrije 4.0 modela uvođenja "infrastrukture" za sve četiri tvrtke

Tablica 16 Usporedba redoslijeda elemenata Industrije 4.0 modela uvođenja "organizacije i ljudskih resursa" za sve četiri tvrtke

	Tvrtka 1		Tvrtka 2		Tvrtka 3		Tvrtka 4	
Rang	Element	Ponder	Element	Ponder	Element	Ponder	Element	Ponder
1	Visoka motivacija svakog radnika	0,0660	Spremnost radnika na promjene	0,0619	Posebni i visokoučinkoviti komunikacijski kanali (društvene mreže)	0,0647	Visoka motivacija svakog radnika	0,0626
2	Prihvaćanje principa cjeloživotnog učenja	0,0655	Prihvaćanje principa cjeloživotnog učenja	0,0610	Visoka motivacija svakog radnika	0,0603	Prihvaćanje principa cjeloživotnog učenja	0,0620
3	Visoka inovativnost radnika	0,0646	Visoka motivacija svakog radnika	0,0599	Prihvaćanje principa kontinuiranog unapređenja (lean, kaizen)	0,0594	Prihvaćanje principa kontinuiranog unapređenja (lean, kaizen)	0,0612
4	Prihvaćanje principa kontinuiranog unapređenja (lean, kaizen)	0,0639	Visoka inovativnost radnika	0,0587	Prihvaćanje principa cjeloživotnog učenja	0,0586	Spremnost radnika na promjene	0,0605
5	Spremnost radnika na promjene	0,0632	Prihvaćanje principa kontinuiranog unapređenja (lean, kaizen)	0,0578	Horizontalna i vertikalna integracija	0,0528	Visoka inovativnost radnika	0,0591
6	Horizontalna i vertikalna integracija	0,0515	Posebni i visokoučinkoviti komunikacijski kanali (društvene mreže)	0,0552	Decentralizacija odjela i tvrtke	0,0515	Vrhunska povezanost sa svima u lancu vrijednosti	0,0512
7	Vrhunska povezanost sa svima u lancu vrijednosti	0,0514	Vrhunska povezanost sa svima u lancu vrijednosti	0,0504	Visoka inovativnost radnika	0,0511	Posebni i visokoučinkoviti komunikacijski kanali (društvene mreže)	0,0505
8	Posebni i visokoučinkoviti komunikacijski kanali (društvene mreže)	0,0388	Horizontalna i vertikalna integracija	0,0476	Vrhunska povezanost sa svima u lancu vrijednosti	0,0509	Horizontalna i vertikalna integracija	0,0500
9	Decentralizacija odjela i tvrtke	0,0351	Decentralizacija odjela i tvrtke	0,0475	Spremnost radnika na promjene	0,0507	Decentralizacija odjela i tvrtke	0,0428



Slika 58 Usporedba elemenata Industrije 4.0 modela uvođenja "organizacije i ljudskih resursa" za sve četiri tvrtke

Iz podataka prikazanih u tablicama 14, 15 i 16 te slikama 56, 57 i 58 vidljivo je kako se prioriteta mijenjaju u odnosu na različite preference tvrtki. Vidljivo je kako ulazni podaci utječu na izlazne te je jasan odraz jačine pondera pojedinog kriterija na redoslijed alternativa. Također, vidljivo je kako se promjenom ulaznih podataka mijenja redoslijed izlaznih podataka, prema zakonitostima određenim postavljenim matematičkim modelom rangiranja i ponderiranja te matematičkom principu AHP metode koja je implementirana u *Expert Choice 11* softvera. Pojedine alternative, kao npr. CAD u prvoj skupini, na prvom su mjestu u tri od četiri slučaja, što nije iznenađujuće budući da se, prema podacima prikupljenim u preliminarnom istraživanju, ista već jako često (gotovo uvijek) koristi u tvrtki, stoga ju je ekspertna skupina prepoznala prema svim kriterijima i teorijskom postavu Industrije 4.0 kao prioritetnu za implementaciju.

Kako bi se razvio optimalni strateški plan implementacije digitalnog sustava te izračunao čimbenik spremnosti pomoću kojeg se trenutno stanje u pojedinoj tvrtki može usporediti s idealnim (ciljanim, budućim), koristit će se ovi dobiveni izlazni podaci (rang alternativa).

7.4. Čimbenik spremnosti

Nakon modela uvođenja koji je definirao redoslijed pojedinih elemenata Industrije 4.0 prema važnosti ovisno o preferencijama pojedine tvrtke, potrebno je napraviti usporedbu trenutnog stanja s idealnim, odnosno kvantificirati ga. To će se odrediti izračunom čimbenika spremnosti koji će pokazati koliko je određena tvrtka spremna za uvođenje novog koncepta, što također u budućnosti može služiti i za usporedbu s ostalim subjektima na tržištu, kao svojevrsna usporedba konkurentne prednosti. Na temelju do sada provedenih istraživanja, strukturiranih procedura za izračun čimbenika spremnosti te prepoznatog otvorenog problema u području, detaljnije pojašnjenog u poglavlju 2, definiran je model za izračun čimbenika spremnosti usmjeren na projektiranje tehnoloških procesa te temeljen na metodi višekriterijalnog odlučivanja, AHP metodi. U obzir se istovremeno uzimaju rangovi pojedinih elemenata po grupama i ocjena trenutnog stanja. Rangovi elemenata su vektor prioriteta kriterija, dok je ocjena trenutnog stanja vektor prioriteta alternativa. Množenjem ova dva vektora dobiva se finalni čimbenik spremnosti, kao što to nalaže AHP metoda, kao što je prikazano u izrazu (3).

$$[x_{11} \quad x_{12} \quad \dots \quad x_{li}]^* \begin{bmatrix} y_{11} \\ y_{21} \\ \dots \\ y_{i1} \end{bmatrix} = F_j, \quad (3)$$

gdje je:

x - ocjena trenutnog stanja tvrtke prema svakom pojedinom elementu

y - rang svakog pojedinog kriterija (elementa Industrije 4.0).

i – broj elemenata Industrije 4.0

j – oznaka grupe elemenata Industrije 4.0

Finalno, čimbenik spremnosti se dobiva kao suma umnožaka važnosti pojedinih skupina i čimbenika pojedinih skupina prema izrazu (4).

$$F = \sum_{j=1}^n F_j * z_j \quad (4)$$

gdje je:

F – ukupan čimbenik spremnosti tvrtke za Industriju 4.0. Čimbenik spremnosti može poprimiti vrijednost od 0 do 1 dok idealna tvrtka uvijek ima čimbenik spremnosti 1.

z – ponder važnosti pojedine grupe elemenata

Dobiven vektor prioriteta tvrtke (rangovi elemenata industrije 4.0) koristit će se kao ponder u stablu kriterija izračuna čimbenika spremnosti. Time se eliminira mogućnost utjecaja subjektivnosti, odnosno kvantificiraju se kvalitativni kriteriji. Suma elemenata vektora prioriteta je 0,5, a suma pondera kriterija u AHP metodi treba biti 1. Zato će se svaki element vektora prioriteta udvostručiti, čime se ne mijenja međusobni omjer važnosti, a zadovoljen je matematički zahtjev metode.

Kako bi se omogućio lakši uvid korisnika, jednostavniji izračun (manipulacija većom količinom podataka), mogućnost automatskog generiranja grafičkog prikaza i provedbu analize osjetljivosti, koristit će se Expert Choice softver kao alat pri izračunu čimbenika spremnosti. Kao alternative postavljene su dvije opcije – *Idealno stanje* i *Trenutno stanje*. Alternative će se prema kriterijima ocjenjivati na temelju ulaznih podataka iz ankete „Spremnost tehnološke pripreme za Industriju 4.0“ koja je u cijelosti dana u Prilogu 6.

U istoj su postavljena pitanja koja se odnose na svaki pojedinačni kriterij, odnosno element Industrije 4.0 u kojem predstavnik tvrtke se izjašnjava o trenutnom stanju u njihovoj radnoj okolini. Za svaki je element ponuđeno pet odgovora, sukladno stupnju razvoja. Za idealu se tvrtku podrazumijeva da je u svakom segmentu na najvišem stupnju razvoja. Odgovori se evaluiraju na skali od 1 do 5, koji se za potrebe matematičke obrade i proračuna čimbenika spremnosti normaliziraju, gdje ocjena 1 poprima vrijednost 0, 2 – 0,25, 3 - 0,5, 4 - 0,75 i 5 –

1. Idealna je tvrtka uvijek ocijenjeno ocjenom 1 te je finalni čimbenik spremnosti moguće ostvariti kao vrijednost u rasponu od 0 do 1. Za svaku skupinu (PPTP, Infrastruktura i Organizacija i ljudski resursi) tako će biti dobiven zaseban čimbenik spremnosti, a finalni će se izračunati kao aritmetička sredina u koju su uključeni i ponderi svake pojedine grupe dobiveni preliminarnim istraživanjem prema izrazu (4) i [21].

7.5. Studija slučaja – izračun čimbenika spremnosti

Za provedbu izračuna čimbenika spremnosti kao primjer je uzeta mikro tvrtka iz sjeverne Hrvatske koja se bavi proizvodnjom i projektiranjem dijelova za robotiku te projektiranjem proizvodnih sustava s tendencijom automatizacije i digitalizacije. Kao takva je upoznata s Industrijom 4.0 te ima tendenciju uvođenja istog, odnosno unapređenje vlastite radne okoline. Glavni ispitanik, predstavnik tvrtke, bio je generalni direktor i osnivač s dugogodišnjim iskustvom u području. Ulazni podaci dobiveni su ispunjavanjem upitnika „Digitalizacija odjela tehnološke pripreme“ (Prilog 6).

Prvi korak je definicija modela uvođenja, odnosno redoslijeda elemenata Industrije 4.0 prema grupama, detaljnije opisan u poglavlju 7.

Što se tiče kriterija koji definiraju njihove ciljeve i preferencije kod uvođenja Industrije 4.0, izjasnili su se kako im je svaki pojedini od pet kriterija jednako važan (ispunili su matricu prioriteta ciljeva, prikazanu na slici 40.). Što znači da im je jednako važno da se uvođenjem poveća produktivnost i kvaliteta, da se uvođe elementi s manjim vremenom povrata investicije, manje složenosti izvedbe i primjene te oni na koje su spremniji za financijsko ulaganje.

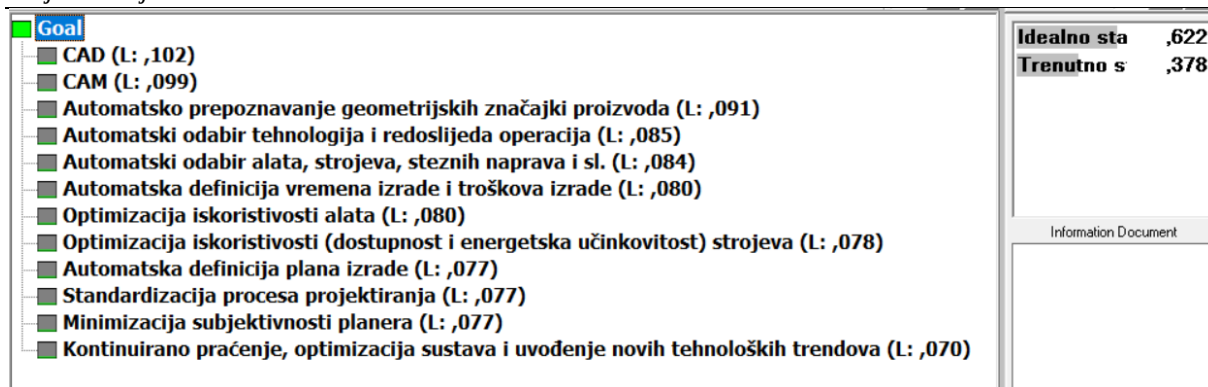
Stoga je model uvođenja, prema grupama „Pametno projektiranje tehnoloških procesa“, „Infrastruktura“ te „Organizacija i ljudski resursi“ prikazan u tablici 17.

Tablica 17 Model uvođenja Industrije 4.0 za tvrtku

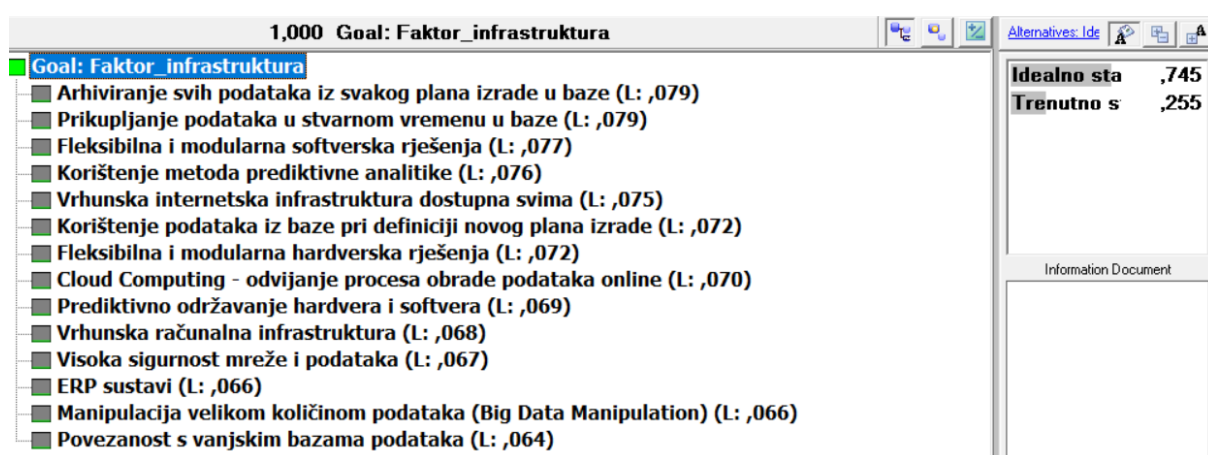
Rang	PPTP		Infrastruktura		Organizacija i ljudski resursi	
	Element	Ponder	Element	Ponder	Element	Ponder
1	CAD	0,0511	Arhiviranje svih podataka iz svakog plana izrade u baze	0,0396	Visoka motivacija svakog radnika	0,0626
2	CAM	0,0496	Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu u baze	0,0394	Prihvatanje principa cjeloživotnog učenja	0,0620
3	Kontinuirano praćenje, optimizacija sustava i uvođenje novih tehnoloških trendova	0,0454	Fleksibilna i modularna softverska rješenja	0,0384	Prihvatanje principa kontinuiranog unapređenja (lean, kaizen)	0,0612

PPTP			Infrastruktura		Organizacija i ljudski resursi	
Rang	Element	Ponder	Element	Ponder	Element	Ponder
4	Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade	0,0424	Korištenje metoda prediktivne analitike	0,0378	Spremnost radnika na promjene	0,0605
5	Standardizacija aktivnosti projektiranja	0,0422	Vrhunska internetska infrastruktura dostupna svima	0,0376	Visoka inovativnost radnika	0,0591
6	Optimizacija iskoristivosti alata	0,0399	Korištenje podataka iz baze pri definiciji novog plana izrade	0,0362	Vrhunska povezanost sa svima u lancu vrijednosti	0,0512
7	Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva	0,0399	Fleksibilna i modularna hardverska rješenja	0,0359	Posebni i visokoučinkoviti komunikacijski kanali (društvene mreže)	0,0505
8	Minimizacija subjektivnosti tehnologa	0,0389	Cloud Computing - odvijanje obrade podataka online	0,0352	Horizontalna i vertikalna integracija	0,0500
9	Automatska definicija plana izrade	0,0385	Prediktivno održavanje hardvera i softvera	0,0343	Decentralizacija odjela i tvrtke	0,0428
10	Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija	0,0384	Vrhunska računalna infrastruktura	0,0340		
11	Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.	0,0384	Visoka sigurnost mreže i podataka	0,0335		
12	Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda	0,035	ERP sustavi	0,0330		
13			Manipulacija velikom količinom podataka (Big Data Manipulation)	0,0328		
14			Povezanost s vanjskim bazama podataka	0,0321		

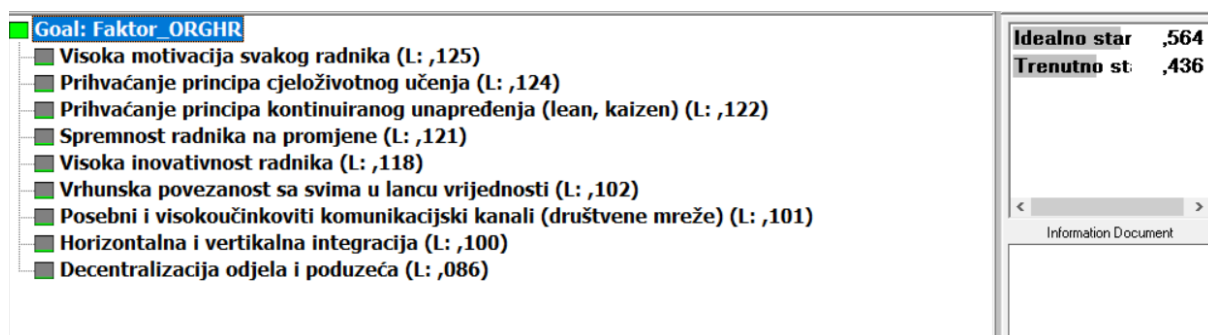
Kako bi se formirala strategija uvođenja, odlučilo koje je elemente potrebno uvesti, potrebno je izvršiti evaluaciju trenutnog stanja, što je također dobiveno ispunjavanjem upitnika "Digitalizacija odjela tehnološke pripreme", na način opisan u poglavlju 7.4. Dvostruka vrijednost dobivenih rangova služi kao ponder kriterija u pojedinoj grupi, kao što je prikazano na slikama 59, 60 i 61.



Slika 59 Stablo kriterija – PPTP – studija slučaja



Slika 60 Stablo kriterija – Infrastruktura – studija slučaja



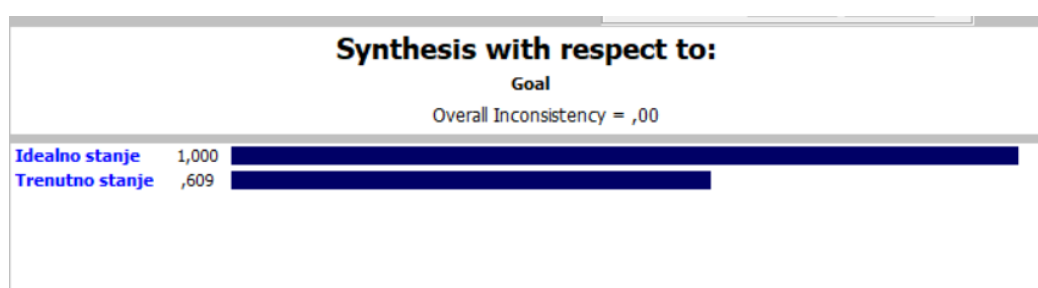
Slika 61 Stablo kriterija – Organizacija i ljudski resursi – studija slučaja

Kako bi se izbjegao utjecaj subjektivnosti, ponderi su u softver uneseni direktnom metodom (eng. *Direct Ratings*). Na jednak način unijeta je i evaluacija alternativa, gdje idealna tvrtka uvijek ima vrijednost 1, a trenutna tvrtka od 0 do 1, sukladno ulaznim podacima iz upitnika. Način unošenja podataka prikazan je na slici 62.

	Ideal mode		DIRECT	DIRECT	DIRECT	DIRECT	DIRECT	DIRECT
AID	Alternative	Total	Optimizacija iskoristivosti alata (L: .0735)	Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva (L: .0735)	Automatska definicija plana izrade (L: .0735)	Standardizacija procesa projektiranja (L: .0882)	Minimizacija subjektivnosti planera (L: .1029)	Kontinuirano praćenje, optimizacija sustava i uvođenje novih tehnoloških trendova (L: .1029)
A1	Idealno stanje	1,0000	1	1	1	1	1	1
A2	Trenutno stanje	,4853	0,25	0,25	0,25	0,5	0,75	0,75

Slika 62 Evaluacija alternativa (eng. Direct Ratings) – case study

Na temelju evaluacije kriterija i alternativa, dobiven je čimbenik spremnosti. On predstavlja normaliziran rezultat vektora cilja, a prema grupama prikazani su na slikama 63, 64 i 65.



Slika 63 Čimbenik spremnosti – PPTP – case study



Slika 64 Čimbenik spremnosti – Infrastruktura – case study



Slika 65 Čimbenik spremnosti – Organizacija i ljudski resursi – case study

Čimbenik spremnosti PPTP-a je 0,609, Infrastrukture 0,342 te Organizacije i ljudskih resursa 0,773. On govori kako je tvrtka trenutno najlošija u području infrastrukture, a da je najrazvijenija u području organizacije. Mogu se interpretirati prema raspodjeli stadija razvijenosti projektiranja tehnoloških procesa, prikazanog na slici 42. Upitnik je imao ciljanih

5 odgovora u kojima je 1 predstavljao PTP 1.0, 2 PTP 2.0, 3 PTP 3.0, 4 PTP 3.5 te 5 PTP 4.0. Što znači da se u području PPTP-a tvrtka nalazi između PTP 3.0 i 3.5. U području infrastrukture između PTP 2.0 i 3.0, a u području organizacije i ljudskih resursa zadovoljava kriterije PTP 3.5 stadija razvoja.

Kako bi se razvila konačna strategija uvođenja Industrije 4.0, potrebno je izračunati finalni čimbenik spremnosti te pogledati detaljniju analizu rezultata.

Tablica 18 Prioriteti važnosti grupa kriterija (dobiveni na temelju rezultata detaljnije objašnjenih u poglavlju 6.2.2)

	Average Rank	Sum of Ranks	Mean	Std. Dev.	Ponder
PPTP	1,7333	52,000	1,8000	0,7144	0,2889
Infrastruktura	1,8500	55,500	1,9000	0,6618	0,3083
Organizacija i ljudski resursi	2,4167	72,500	2,4667	0,8604	0,4028
Σ	6,0000				1

Finalni čimbenik spremnosti, prema izrazu (4) tako iznosi:

$$F = \sum_{j=1}^n F_j * z_j = (0,2889 * 0,609 + 0,3083 * 0,342 + 0,4028 * 0,773) = 0,5927$$

čime se zaključuje da tvrtka pripada skupini Industrije 3.0. S obzirom da je raspodjela čimbenika spremnosti u modelu 0,5-0,75 kao ocjena karakteristika Industrije 3.0, trenutni čimbenik spremnosti ove tvrtke je na donjoj granici.

7.5.1. Strategija uvođenja elemenata Industrije 4.0

Pri definiranju strategije uvođenja, potrebno je razmotriti rezultate evaluacije trenutnog stanja. Elementi koji su dobili ocjenu 1 (5) te su tako izjednačeni s idealnom tvrtkom, ne trebaju se uvoditi ili unaprijediti, kada postoji bazni oblik istih u tvrtki, a to su „CAD“ u grupi „PPTP“, te „Motivacija radnika“, „Inovacija radnika“, „Prihvatanje principa cjeloživotnog učenja“ i „Spremnost radnika na promjene“ u grupi „Organizacija i ljudski resursi“. U grupi „Infrastruktura“ niti jedan element nije dobio najvišu ocjenu. Stoga su elementi prema prioritetima uvođenja prikazani u tablici 20. Najviši prioritet imaju kriteriji iz grupe „Organizacija i ljudski resursi“ stoga se preporučuje da se najprije usvoji princip kontinuiranog unapređenja, zatim poradi na povezanosti među sudionicima lanca vrijednosti, unaprijede komunikacijski sustavi te poradi na horizontalnoj i vertikalnoj integraciji kao i decentralizaciji tvrtke. Sljedeći po važnosti su elementi iz grupe „Infrastruktura“ među kojima je prioritet razvoj naprednih baza podataka. Slijedi potreba za modularnošću i fleksibilnošću

softverskog sustava, korištenjem metoda prediktivne analitike, vrhunskom internetskom infrastrukturom i *Cloud Computingom* gdje se sustav, kako softverski, kako hardverski, treba početi održavati metodama prediktivnog održavanja koje će i biti omogućeno u optimalnom obliku kada se usvoje ranije navedeni elementi s većim značajem. Nadalje je potrebno unaprijediti računalnu infrastrukturu, podići razinu sigurnosti podataka i sustava, implementirati ERP sustav, omogućiti bolju povezanost kako bi se, finalno, moglo u optimalno prikupljati, obrađivati i pohranjivati velika količina podataka u realnom vremenu.

Slijede elementi iz „PPTP“ grupe, od kojih je primarno unapređenje CAM sustava te usvajanje navike praćenja i uvođenja novih tehnoloških trendova, uz kontinuirano praćenje i optimizaciju sustava. Zatim je potrebno automatizirati definiciju vremena i troškova izrade te standardizirati aktivnosti projektiranja kako bi se moglo pristupiti optimizaciji iskoristivosti alata i energetske učinkovitosti strojeva, minimizirati utjecaj subjektivnosti tehnologa te ostvariti automatsku definiciju cjelokupnog plana izrade. Sustav PPTP upotpunjuje se implementacijom procedura za automatski odabir tehnologija, strojeva, steznih naprava i geometrijsko prepoznavanje značajki proizvoda na temelju 3D modela, kao jednog od najkompleksnijeg elementa ove grupe.

Na ovaj način se uz izražene prioritete ciljeva tvrtke može postići optimalna tranzicija iz trenutnog stanja u idealno, odnosno u potpunosti usvojiti koncept Industrije 4.0 kod projektiranja tehnoloških procesa.

Tablica 19 Strategija uvođenja elemenata Industrije 4.0 za tvrtku iz studije slučaja

Rang	1. Organizacija i ljudski resursi	Rang	2. Infrastruktura	Rang	3.PPTP
1	Prihvatanje principa kontinuiranog unapređenja (lean, kaizen)	1	Arhiviranje svih podataka iz svakog plana izrade u baze	1	CAM
2	Vrhunska povezanost sa svima u lancu vrijednosti	2	Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu u baze	2	Kontinuirano praćenje, optimizacija sustava i uvođenje novih tehnoloških trendova
3	Posebni i visokoučinkoviti komunikacijski kanali (društvene mreže)	3	Fleksibilna i modularna softverska rješenja	3	Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade
4	Horizontalna i vertikalna integracija	4	Korištenje metoda prediktivne analitike	4	Standardizacija aktivnosti projektiranja
5	Decentralizacija odjela i tvrtke	5	Vrhunska internetska infrastruktura dostupna svima	5	Optimizacija iskoristivosti alata
		6	Korištenje podataka iz baze pri definiciji novog plana izrade	6	Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva
		7	Fleksibilna i modularna hardverska rješenja	7	Minimizacija subjektivnosti tehnologa
		8	Cloud Computing - odvijanje obrade podataka online	8	Automatska definicija plana izrade
		9	Prediktivno održavanje hardvera i softvera	9	Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija
		10	Vrhunska računalna infrastruktura	10	Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.
		11	Visoka sigurnost mreže i podataka	11	Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda
		12	ERP sustavi		
		13	Manipulacija velikom količinom podataka (Big Data Manipulation)		
		14	Povezanost s vanjskim bazama podataka		

8. ZAKLJUČAK

Industrija 4.0 od predstavljanja koncepta 2011. postala je imperativ svjetske industrije. Bilo da se radi o proizvodnim ili uslužnim tvrtkama, princip digitalizacije prihvaćen je diljem svijeta prema geografski specijalizirano razvijenim strategijama. Globalni napredak tehnologije, njena sve veća dostupnost, šira primjenjivost te sve niža cijena omogućuju prirodan postupak transformacije ka konceptu u potpunosti digitaliziranog proizvodnog sustava, no prirodni je postupak potrebno ubrzati kako bi se zadržala konkurentska prednost na dinamičnom i nepredvidljivom tržištu. Tranzicija veoma je kompleksana i složena te zahtjeva velika financijska ulaganja. Posebno je složen za male i srednje tvrtke koja bi u relativnom kratkom vremenu vrlo brzo mogla izgubiti konkurentsku prednost na tržištu, budući da su „veliki igrači“ već počeli s digitalizacijom zbog jednostavnije mogućnosti realizacije, prvenstveno u financijskom smislu. Zbog toga je od neizmjerne važnosti razviti optimalnu strategiju te usporediti sadašnje stanje s budućim, što omogućuje izračun čimbenika spremnosti. Njime se, osim usporedbe s ciljanim stanjem, tvrtka može usporediti i s konkurentima iz branše, bilo da se radi o regionalnim, državnim ili čak konkurentima na svjetskoj razini.

Projektiranje tehnoloških procesa još je uvijek većinom tradicionalno orijentirano, a tijekom prihvaćanja koncepta Industrije 4.0 prolazit će kroz mnoge, poprilično složene promjene. Radi se o veoma važnom segmentu lanca vrijednosti budući da s novim konceptom se naveliko prihvaća termin fleksibilnosti i pametnih, personaliziranih proizvoda čiji se plan izrade treba generirati s ciljem što manjih troškova i kraćeg roka isporuke. Zbog toga je razvijen sustav „Pametnog projektiranja tehnoloških procesa“, opisan u ovom radu, model uvođenja Industrije 4.0 i izračun čimbenika spremnosti za Industriju 4.0 usmjeren na projektiranje tehnoloških procesa.

Zaključak doktorskog rada definirat će se kroz: ostvarene ciljeve doktorskog rada, potvrđenu hipotezu, ostvareni znanstveni doprinos doktorskog rada te smjernice za buduća istraživanja.

8.1. Ostvareni ciljevi doktorskog rada

Ovim su doktorskim radom ostvarena tri cilja:

1. Razvijen je model za izračun čimbenika spremnosti uvođenja koncepta Industrije 4.0 usmjerenog na projektiranje tehnoloških procesa temeljen na modelima višekriterijalnog

odlučivanja i optimiranja. Ulazni podaci modela su preferencije tvrtke pri implementaciji Industrije 4.0 koji daju odgovore na pitanje što im je najvažnije u tranziciji, odnosno s kojim ciljem uvode određene elemente Industrije 4.0. To su povećanje produktivnosti, povećanje kvalitete, spremnost financijskog ulaganja, složenost izvedbe i primjene te očekivano vrijeme povrata investicije. Na temelju preferenci model generira redoslijed elemenata Industrije 4.0 unutar tri grupe – „Pametno projektiranje tehnoloških procesa“, „Infrastruktura“ te „Organizacija i ljudski resursi“. U izradu modela sudjelovalo je trideset eksperata iz područja projektiranja tehnoloških procesa, od čega petnaest iz proizvodnog sektora i petnaest iz znanstvenog sektora. Matematički model rangiranja sastoji se od kombinacije statističke metode Friedmanova testa dio kojeg se koristi samo za rangiranje kriterija (preferiranih ciljeva, ulaznih podataka) i ponderiranje te analitičkog hijerarhijskog procesa koji finalno daje rangove elemenata u svakoj pojedinoj skupini. Na temelju tog ranga i dobivenih pondera (međusobnog odnosa kriterija, elemenata Industrije 4.0) formira se stablo kriterija te uz ulazne podatke o trenutnom stanju tvrtke s obzirom na svaki pojedini kriterij, analitičkim hijerarhijskim procesom izračunava se čimbenik spremnosti te je tako moguće spoznati trenutnu udaljenost tvrtke s obzirom na idealno stanje i razviti optimalnu strategiju uvođenja elemenata Industrije 4.0 u tvrtku (poglavlje 7).

2. Definirani su kriteriji potrebni za izračun čimbenika spremnosti tvrtke za koncept Industrije 4.0. koji se odnose na projektiranje tehnoloških procesa. Na temelju istraživanja literature spoznati su do sada korišteni kriteriji (dimenzije) koji su bili korišteni pri izračunu čimbenika spremnosti. Isti su se u kombinacijom idealnog stanja projektiranja tehnoloških procesa u Industriji 4.0 prilagodili ovom slučaju, te su kao takvi svrstani u tri kategorije – „Pametno projektiranje tehnoloških procesa“, „Infrastruktura“ i „Organizacija i ljudski resursi“. Unutar tri navedene grupe nalaze se kriteriji koji opisuju svaki segment koji je potrebno modificirati kako bi se ostvario cilj, tj. provjeriti njegovo trenutno stanje, potencijal i prioritet za optimalnu tranziciju. Radi se o opisu specifičnog slučaja, te je problem projektiranja u Industriji 4.0 sagleda i sa šireg aspekta cjelokupnog sustava, istovremeno se osvrnuvši na specijalizirane detalje koji detaljno opisuju svaki segment ciljane radne okoline (poglavlje 7.1).

3. Definirana je metoda kvantifikacije kvalitativnih kriterija s ciljem minimiziranja subjektivnosti pri evaluaciji. Budući da se radi o procjeni trenutnog stanja te usporedbi s budućim, bilo je potrebno eliminirati utjecaj subjektivnosti pojedinca kako bi se dobio objektivan izračun čimbenika spremnosti. Formirana je ekspertna skupina od 30 sudionika iz

područja koji su na temelju svog dugogodišnjeg iskustva i rada u području procijenili definirane kriterije prema pet ciljeva implementacije koncepta Industrije 4.0. Rangovi kriterija dobiveni kombinacijom statističkog Friedmanovog testa i analitičkog hijerarhijskog procesa (poglavlje 7) u modelu uvođenja koriste se kao ponderi pri izračunu čimbenika spremnosti analitičkim hijerarhijskim procesom (metodom višekriterijskog optimiranja) čime je realizirana kvantifikacija s minimalnim utjecajem ljudske subjektivnosti.

8.2. Potvrda hipoteze doktorskog rada

Ovim je doktorskim radom potvrđena postavljena hipoteza:

„Moguće je razviti model za izračun čimbenika spremnosti tvrtke za primjenu koncepta Industrije 4.0 temeljen na metodama višekriterijalnog odlučivanja i optimiranja, usmjeren na projektiranje tehnoloških procesa.“

Čimbenik spremnosti za Industriju 4.0 izračunat je tako primjenom analitičkog hijerarhijskog procesa koji je, prema provedenom istraživanju (poglavlje 5.6) odabran kao optimalna metoda višekriterijalnog odlučivanja i optimiranja za ovaj otvoreni problem. Razvijeno je idealno stanje projektiranja tehnoloških procesa („pametno projektiranje tehnoloških procesa“, poglavlje 4) te uz utjecaj ostalih utjecaja na radnu okolinu definirano je stablo kriterija u tri grupe (poglavlje 7.1). Kriteriji su prema ciljevima evaluirani od strane ekspertne grupe te se prema željenim ciljevima pojedine tvrtke definirao prioritet njihova uvođenja, nakon čega se primjenom metode analitičkog hijerarhijskog procesa izračunao čimbenik spremnosti za Industriju 4.0 usmjeren na projektiranje tehnoloških procesa čime je potvrđena hipoteza. Model je verificiran primjenom analize osjetljivosti (poglavlje 7.3), njegova je primjenjivost dokazana simulacijom u poglavlju 7.3.2 kao i u provedenoj studiji slučaja na realnom primjeru u poglavlju 7.5.

8.3. Ostvareni znanstveni doprinos doktorskog rada

Istraživanjem dosadašnje teorije i prakse o primjeni koncepta Industrije 4.0 te izračunu čimbenika spremnosti uviđen je otvoreni problem koji je bio motivacija za istraživanje izračuna čimbenika spremnosti za Industriju 4.0 usmjerenog na projektiranje tehnoloških procesa. Sukladno tome, ovim je doktorskim radom ostvaren sljedeći znanstveni doprinos:

1. Definirani su kriteriji za izračun čimbenika spremnosti tvrtke za koncept Industrije 4.0 usmjerenih na projektiranje tehnoloških procesa.

2. Izrađen je model izračuna čimbenika spremnosti tvrtke za implementaciju koncepta Industrije 4.0 usmjerenoga na projektiranje tehnoloških procesa koji je verificiran analizom osjetljivosti, simulacijom dok je primjenjivost u praksi potvrđena provedbom studije slučaja na realnom primjeru.

3. Definiran je novi postupak kvantifikacije utjecajnih kriterija s kojim je minimiziran utjecaj ljudske subjektivnosti u procesu izračuna čimbenika spremnosti.

8.4. Buduća istraživanja

Buduća istraživanja mogu se razviti u nekoliko smjerova.

Prvi je automatizacija izračuna čimbenika spremnosti za Industriju 4.0 usmjerenog na projektiranje tehnoloških procesa, u smislu razvoja aplikacije koja će korisniku automatski na temelju primijenjene metode izračunati trenutno stanje, definirati strateški plan i omogućiti prikaz usporedbe s konkurentskim tvrtkama.

Drugi je primjena modela izračuna čimbenika spremnosti i na druga proizvodna područja kao što su logistika, održavanje, planiranje proizvodnje, proizvodnja i slično. Za njih je potrebno definirati specijalizirane kriterije koji se nadalje obrađuju na jednak način. Određeni segmenti tvrtke se tako mogu i objediniti čime se dobiva detaljna i personalizirana analiza trenutnog stanja tvrtke.

Treći je provedba istog istraživanja te razvoj modela u drugim geografskim jedinicama, kao što je pojedina država, regija ili šire geografsko područje te usporediti rezultate i provjeriti utjecaj razlika kako u modelu uvođenja (rangu kriterija) ili u općenitom čimbeniku spremnosti pojedinih tvrtka iz određenog područja, što također govori o industrijskom napretku pojedinih geografskih područja.

LITERATURA

- [1] Holler, J., Tsiatsis, V., Mulligan, C., Stamatis, K., Stefan, A., Boyle, D.: Internet of Things 1st Edition, Academic Press, 2014.
- [2] Klitou, D. et al: Digital Transformation Monitor - Germany: Industrie 4.0. European Union, 2017.
- [3] Kania, E.: Made in China 2025, Explained <https://thediplomat.com/2019/02/made-in-china-2025-explained/> (pristupljeno: 27.5.2020.)
- [4] National IOT Strategy Dialogue, <https://www.itic.org/dotAsset/bdce6de4-8a00-49c5-a7a9-4dfb95609a76.pdf> (pristupljeno: 27.5.2020.)
- [5] Schroeder, W.: Germany's Industry 4.0 strategy: Rhine capitalism in the age of digitalisation, Friedrich Ebert Stiftung, London, 2016.
- [6] Trstenjak, M.: Challenges of Human Resources Management with implementation of Industry 4.0, Proceedings of IOTSM2018 Scientific Conference, 2018, London, UK ,
- [7] Impuls-stiftung: Industrie 4.0-Readiness, 2018
- [8] Economic Development Board Singapore: The Singapore Smart Industry Readiness Index, 2018
- [9] KPMG Atlas: Industrie 4.0 Readiness Assessment, 2018
- [10] pwc: Industry 4.0 - Enabling Digital Operations, 2016
- [11] Godsell, J., Agca, O., Gibson, J., Ignatius, J., Daview, C.W., Xu, O.: An Industry 4 readiness assessment tool, International Institute for Product and Service Innovation, The University of Warwick, 2018
- [12] I-Scoop: Gaps in Industry 4.0 readiness contribute to Industrie 4.0 Maturity Index, 2018
- [13] Industry 4WRD: National Policy on Industry 4.0, Ministry of International Trade and Industry, Malaysia, 2018
- [14] Martin, C. et al: Readiness for the Future of Production Report, 2018
- [15] McKinsey and Company: Industry 4.0 at McKinsey's model factories, 2018
- [16] Boston Consulting Group: Embracing Industry 4.0 and Rediscovering Growth, 2018
- [17] Circumference Technology Service: Transitioning To An Industry 4.0 Capable Factory: An Essential Step To Future-Proofing Your Manufacturing Operations, 2018

- [18] Blanchet, M., Rinn, T., von Thaden, G. de Thieulloy, G.: Industry 4.0: The new industrial revolution - How Europe will succeed, Roland Berger Strategy Consultants, 2014, GMBH, Munich, Germany.
- [19] Capgemini: Industry 4.0 Maturity Model – Mirroring today to sprint into the future, 2018
- [20] The Manufacturer: Industry 4.0 UK Readiness Report, 2018
- [21] Schumacher, A., Erol, S., Sihn, W.: A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises, *Procedia CIRP*, 2016, 52, 161-166
- [22] Basl, J., Doucek, P.: A Metamodel for Evaluating Enterprise Readiness in the Context of Industry 4.0, *Information*, 2019, 10(89)
- [23] Nick, G., Pongracz, F.: How to measure industry 4.0 readiness of cities. Scientific proceedings of International scientific conference Industry 4.0, 2016, 64-68, Borovets, Bulgaria
- [24] Ganzarain, J., Errasti, N.: Three stage maturity model in SME's toward industry 4.0, *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2016, 9(5), 1119-1128
- [25] Gill, M. & VanBoskirk, S.: The Digital Maturity Model, Forrester Research, Inc. 2016, Cambridge, MA, USA.
- [26] Koska, A., Göksu, N., Mehri B., Fettahlioglu, H.S.: Measuring the Maturity of a Factory for Industry 4.0, *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 2017, 7(7), 52-60
- [27] Babić, Z., Veža, I., Pavić, I.: Ranking of enterprises with regard to industrial maturity level using AHP and TOPSIS, *ISAHP 2016*
- [28] Trotta, D., Garengo P.: Assessing Industry 4.0 Maturity: An Essential Scale for SMEs, *Proceedings of 8th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*, 2019, Cambridge, United Kingdom, 69-74
- [29] Popkova E.G., Egorova E.N., Popova E., Pozdnyakova U.A.: The Model of State Management of Economy on the Basis of the Internet of Things, Ubiquitous Computing and the Internet of Things: Prerequisites for the Development of ICT, *Studies in Computational Intelligence*, 826, Springer, 2019 https://doi.org/10.1007/978-3-030-13397-9_116

- [30] Hamidi S.R., Aziz A.A., Shuhidan S.M., Aziz A.A., Mokhsin M.: SMEs Maturity Model Assessment of IR4.0 Digital Transformation, Proceedings of the 7th International Conference on Kansei Engineering and Emotion Research, Advances in Intelligent Systems and Computing, 2018, 739 Springer, Singapore
- [31] Ratnasingam, J., Ab Latib, H., Yi, L., Liat, L., Khoo, A.: Extent of automation and the readiness for industry 4.0 among Malaysian furniture manufacturers. *BioResources*, 2019, 14(3), 7095-7110
- [32] Modrak V., Soltysova Z., Poklemba R.: Mapping Requirements and Roadmap Definition for Introducing I 4.0 in SME Environment. *Advances in Manufacturing Engineering and Materials. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2019, Springer
- [33] Krykavskyy, Y., Pokhylchenko, O., Hayvanovych, N.: Supply chain development drivers in industry 4.0 in Ukrainian enterprises, *Oeconomia Copernicana*, 2019, 10(2), 273-290
- [34] Brozzi R., D'Amico R.D., Pasetti Monizza G., Marcher C., Riedl M., Matt, D.: Design of Self-assessment Tools to Measure Industry 4.0 Readiness, A Methodological Approach for Craftmanship SMEs, Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0, PLM 2018, IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2018, 540. Springer
- [35] Castelo-Branco, I., Cruz-Jesus, F., Oliveira, T.: Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union, *Computers in Industry*, 2019, 107, 22-32
- [36] Leyh, C., Schäffer, T., Bley, K., Bay, L.: The Application of the Maturity Model SIMMI 4.0 in Selected Enterprises, Proceedings of 23rd Americas Conference on Information Systems, AMCIS 2017, Boston, MA, USA
- [37] Haddara, M., Elragal, A.: The Readiness of ERP Systems for the Factory of the Future, *Procedia Computer Science*, 2015, 74, 721-728
- [38] Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., ten Hompel, M., Wahlster, W.: *Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies (aratech STUDY)*. Herbert Utz Verlag, Munich, 2017
- [39] De Carolis, A., Macchi, M., Negri, E., Terzi, S.: A Maturity Model for Assessing the Digital Readiness of Manufacturing Companies, Proceedings of IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems, Springer International Publishing, 2017, 13-20

- [40] Gracel, J., Łebkowski, P.: The Concept of Industry 4.0 Related Manufacturing Technology Maturity Model (Manutech Maturity Model, MTMM), *Decision Making in Manufacturing and Services*, 2019, 12, 17-31
- [41] Wang, H., Chen, K., Xu, D.: A maturity model for blockchain adoption, *Financial Innovation*, 2016, 2(12)
- [42] Sjödin, D.R., Parida, V., Leksell, M., Petrovic, A.: Smart Factory Implementation and Process Innovation, *Research-Technology Management*, 2018, 61(5), 22-31
- [43] Gajšek, B., Sternad, M., Lerher, T.: Maturity Levels For Logistics 4.0 Based On NrW'S Industry 4.0 Maturity Model, *Proceedings of 18th international scientific conference Business Logistics in Modern Management*, Osijek, Croatia, 2018, 695-708
- [44] Asdecker, B., Felch, V.: Development of an Industry 4.0 maturity model for the delivery process in supply chains, *Journal of Modelling in Management*, 2018, 13(4), 840-883
- [45] Kaltenbach, F., Marber, P., Gosemann, C., Böltz, T., Kühn, A.: Smart Services Maturity Level in Germany, *Proceedings of IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, Stuttgart, 2018
- [46] Canetta, L., Barni, A., Montini, E.: Development of a Digitalization Maturity Model for the Manufacturing Sector, *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)* Stuttgart, 2018
- [47] dos Santos K.C.P., de Freitas Rocha Loures E., Junior O.C., Santos E.A.P.: Product Lifecycle Management Maturity Models in Industry 4.0, *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0. PLM 2018, IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 2018, 540, Springer
- [48] Ustundag, A., Cevikvan, E.: *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*, Springer International Publishing Switzerland, 2018.
- [49] Schwab, K.: *The Fourth Industrial Revolution*, Currency, 2017.
- [50] Capasso, A., Veneri, G.: *Hands-On Industrial Internet of Things: Create a powerful Industrial IoT infrastructure using Industry 4.0*, Packt Publishing, 2018.
- [51] Jain, N.K., Jain, V.K.: *Computer Aided Process Planning for Agile Manufacturing Environment*, *Agile Manufacturing: The 21st Century Competitive Strategy*, pp 515-534, Elsevier, 2001.
- [52] Kochan, A., Cowan, D.: *Implementing CIM - Computer Integrated Manufacturing*, Bedford and Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1986.

- [53] Radhakrishnan, P. Subramanyan, S., Raju, V.: CAD/CAM/CIM, New Age International, 2008.
- [54] Veilleux, R.: Tool and Manufacturing Engineers Handbook: Manufacturing Management, Society of Manufacturing Engineers, 1988.
- [55] Attaran, M.: CIM: getting set for implementation, Industrial Management & Data Systems, vol. 97, br. 1, 1997.
- [56] Mourtzis, D., Doukas, M., Psarommatis, F.: Simulation-Based Design of Production Networks for Manufacturing of Personalised Products, Advances in Production Management Systems, Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services, APMS 2012. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 397. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [57] Scheer, A.W.: CIM Computer Integrated Manufacturing: Towards the Factory of the Future, Springer Science & Business Media, 2012.
- [58] Meijer, G.R., Kirchhoff, U.: CIM Design Methodology: Managing the Realisation of CIM systems, Realising CIM's Industrial Potential, IOS Press, 1993.
- [59] Mertins, K., Süßenguth, W., Jochem, R.: Planning of Enterprise-Related CIM Structures, Manufacturing Research and Technology, Vol. 16, pp 67-76, 1993.
- [60] Chen, I.J.: Planning for ERP systems: analysis and future trend, Business Process Management Journal, Vol. 7, Br. 5., pp 374-386, 2001.
- [61] Xue, J.: Integration of CAD/CAPP/CAM, De Gruyter STEM, 2018.
- [62] Norton, N.L.: CAM Design and Manufacturing Handbook, Industrial Press Inc., 2009.
- [63] Chang, K-H.: Product Design Modeling using CAD/CAE, Academic Press, Elsevier Inc., 2014.
- [64] Rembold, U.; Dillmann, R.: Computer-Aided Design and Manufacturing: Methods and Tools, Springer Science & Business Media, 2012.
- [65] Hazarika, M.; Dixit, U.: Setup Planning for Machining. Springer, 2015.
- [66] Pandey, M.P.: Computer Aided Process Planning, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur, India
- [67] Lukić, D.; Milošević, M.; Velimir, T.: Integrirani CAPP sistemi i tehnološka baza podataka (Modul Integrirani CAPP sistemi). Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu. Novi Sad, 2013.
- [68] Crow, K.: Strategy, Organization, Process, Methodologies, Technology. NPD Solutions, SAD, 1992.

- [69] Monka, P.; Monkova, K.: Individual Application System for Computer Aided Process Planning. Proceedings of the World Congress on Engineering, vol 3., London, 2012.
- [70] Architecture Technology Corpor: Computer Aided Process Planning (CAPP): 2nd Edition, Elsevier Science, 2016..
- [71] Kang, S.; Park, D.: Application of computer-aided process planning system for non-axisymmetric deep drawing products. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 124, br. 1-2, lipanj 2002., str. 36-48.
- [72] Ahman, N.; Haque, A.; Hasin, A.: Current Trend in Computer Aided Process Planning. Proceedings of the 7th Annual Paper Meet and 2nd International Conference. The Institution of Engineering. Br. 10, str. 81-92. Bangladeš, listopad, 2001.
- [73] Halevi, G.; Weill, R.: Principles of Process Planning. Springer, 1995.
- [74] Scallan, P.: Process Planning: The design/manufacture interface. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2003.
- [75] Rahman, M.A.A., Mo, J.P.T.: Design Methodology for Manufacturing Automation System Reconfiguration, ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Expositions, 2010.
- [76] ElMaraghy, H.A.: Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, Vol 17, pp 261-276, 2005.
- [77] Chryssolouris, E.L.K.E: Manufacturing Systems: Theory and Practice, Springer-Verlag New York, 2006.
- [78] Tolio, T.: Design of Flexible Production Systems, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [79] Regodić, D., Jovanović, S., Tovsic, P: Fleksibilni proizvodni sistemi. Inžinjski menadžment, 2010.
- [80] Möller, D.P.F.: Guide to Computing Fundamentals in Cyber-Physical Systems, Springer International Publishing, 2016.
- [81] Introduction to RFID Modules – Construction, Types and Working. <https://components101.com/articles/introduction-rfid-modules-construction-types-and-working> (10.12.2020.)
- [82] Suh, S.C., Tanik, U.J., Carbone, J.N., Eroglu, A.: Applied Cyber-Physical Systems, Springer-Verlag New York, 2014.
- [83] Auer, M.E., Bhimavaram, K.R.: Cyber-physical Systems and Digital Twins, Proceedings of the 16th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, Springer International Publishing, 2020.

- [84] Tao, F., Zhang, M., Nee, A.Y.C.: Digital Twin Driven Smart Manufacturing, Academic Press, 2019.
- [85] Armendia, M., Ghassempouri, M., Ozturk, E., Peysson, F.. Twin-Control - A Digital Twin Approach to Improve Machine Tools Lifecycle, Springer International Publishing, 2019.
- [86] Gačnik, V., Vodenik, F.: Projektiranje tehnoloških procesa: optimizacija režima i vremena obrade. Tehnička knjiga, Zagreb, 1990.
- [87] Gologlu, C.: A constraint-based operation sequencing for a knowledge-based process planning. Journal of Intelligent Manufacturing, br. 15, 2004., 463-470.
- [88] Kafashi, S.: Integrated setup planning and operation sequencing (ISOS) using genetic algorithm. International Journal of Advanced Manufacturing Technologies. Springer, 2011.
- [89] Nallakumarasamy, G.; Srinivasan, P.; Venkatesh Raja, K.; Malayalamurthi, R.: Optimization of operation sequencing in CAPP using simulated annealing technique (SAT). International Journal of Advanced Manufacturing Techolgies. Br. 54, 2011. 721-728.
- [90] Laarhoven, PJM., Aarts, EHL: Simulated annealing: Theory and Applications. Springer Science, Dordrecht, 1978.
- [91] Trstenjak, M., Ćosić, P.: Process planning in Industry 4.0 environment, Procedia Manufacturing, 2017, 11, 1744-1750
- [92] Decision Support Systems Resources, <http://dssresources.com/> (zadnji pristup: 30.6.2020.)
- [93] Tzeng, G-H; Huang, J-J.: Multiple Attribute Decision Making: Methods and applications. CRC Press, 2011.
- [94] An extension of TOPSIS for group decision making. Mathematical and Computer Modelling. Vol 45, No 7, 2017, 801-813
- [95] Roy. B: The Outranking Approach and the Foundations of Electre Methods. Readings in Multiple Criteria Decision Aid. Springer, Berlin, Heidelberg, 1990, 155-183
- [96] Venkata Rao, R.; Patel, B.K.: Decision making in the manufacturing environment using an improved PROMETHEE method. International Journal of Production Research, vol 48, no 16, 2010, 4665-4682
- [97] Visual Promethee. <http://www.promethee-gaia.net/software.html> (25.8.2018.)
- [98] Begićević, N.: Doktorska dizertacija: Višekriterijalni modeli odlučivanja u strateškom planiraju uvođenja e-učenja. FOI. Varaždin, 2008.

- [99] Lisjak, Dragutin. Održavanje. Održavanje. Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zagreb, studeni 2019.
- [100] Expert Choice, <http://expertchoice.com/> (zadnji pristup: 30.6.2020.)
- [101] Popkova, E.G., Ragulina, J.V., Bogoviz, A.V.: Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century, Springer International Publishing, 2019.
- [102] Digitalna komora, <https://digitalnakomora.hr/home> (zadnji pristup: 30.3.2020.)
- [103] Keener, R.: Theoretical Statistics, Springer-Verlag New York, 2010.
- [104] McKnight, P.E., Najab, J. Mann-Whitney U Test, The Corsini Encyclopedia of Psychology, John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [105] Matlab, <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (zadnji pristup: 30.6.2020.)
- [106] Ranksum, Matlab, <https://www.mathworks.com/help/stats/ranksum.html> (zadnji pristup: 30.6.2020.)
- [107] Statistica, <https://www.statsoft.de/en/home> (zadnji pristup: 30.6.2020.)
- [108] Mack, G., Skillings, J.H.: A Friedman-Type Rank Test for Main Effects in a Two-Factor ANOVA, Journal of the American Statistical Association, Vol 75, Br 372, 1980., 947-951
- [109] Opetuk, T.: Model uvođenja upravljanja zelenim lancima opskrbe, Doktorski rad. FSB, 2016.
- [110] Hegedić, M.: Model upravljanja proizvodnjom integriranjem vitkoga i zelenoga menadžmenta, Doktorski rad, FSB, 2017.
- [111] Kovačec, M.: Model učinkovitoga upravljanja proizvodnim sustavima, Doktorski rad. FSB, 2015.

9. PRILOZI

Prilog 1 Anketa „Digitalizacija odjela tehnološke pripreme“

Prilog 2 Mann Whitney U-test uzoraka prema skupinama

Prilog 3 Anketa „Digitalizacija projektiranja tehnoloških procesa“

Prilog 4 Obrada podataka i ponderiranje

Prilog 5 Analiza osjetljivosti modela

Prilog 6 Anketa „Spremnost tehnološke pripreme za Industriju 4.0“

Prilog 1 Upitnik „Digitalizacija odjela tehnološke pripreme“

Digitalizacija odjela tehnološke pripreme

U nastavku se nalazi nekoliko pitanja koja će pomoći pri formiranju faktora spremnosti odjela tehnološke pripreme (koji se bavi projektiranjem tehnoloških procesa za izradu određenog proizvoda) za koncept Industrije 4.0.

Procijenjeno vrijeme ispunjavanja ankete je 10 minuta.

Dobiveni se podaci koriste za istraživanje u okviru izrade Doktorskog rada.

Ukoliko postoji problem s javnim objavljivanjem danih podataka, molim Vas da se javite na maja.trstenjak@fsb.hr.

* Required

Ime tvrtke: *

Your answer

Vaša pozicija unutar tvrtke: *

Your answer

Razina i vrsta obrazovanja *

- ☐ Strojarski tehničar (SSS)
- ☐ Sveučilišni prvostupnik (VŠSS)
- ☐ Magistar tehničke struke (VSS)
- ☐ Viši stupanj ([dr.sc.](#); M.sc, itd.)

Koju vrstu proizvoda izrađujete? *

- ☐ Vlastiti razvoj i konstrukcija proizvoda
- ☐ Izrada i razvoj tehnologije izrade prema dostavljenoj tehničkoj dokumentaciji

Jeste li upoznati s pojmom Industrije 4.0? *

- ☐ DA
- ☐ NE

U radu unutar vlastitog odjela, koliko često izmjenjujete informacije s drugim odjelima? *

- | | | | | | | |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Nikada | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | ☐ | Jako često |

Koristite li CAD softver? *

- ☐ DA
- ☐ NE

Koristite li CAM softver? *

- ☐ DA
- ☐ NE

Jeste li upoznati s pojmom CAPP sustava? *

☐ DA

☐ NE

Postoji li arhiva izradaka s razvijenim tehnološkim procesima u vašoj kompaniji? *

☐ DA

☐ NE

Koristite li stare podatke iz arhive za projektiranje tehnoloških procesa novih narudžba kupca? *

☐ DA

☐ NE

Obavlja li projektiranje tehnoloških procesa jedna ili više osoba? *

☐ Jedna osoba

☐ Više osoba

☐ Tim

☐ Other: _____

Postoji li baza operacija, strojeva, alata, naprava za definiranje tehnološkog procesa izratka? *

☐ DA

☐ NE

Ako imate bazu podataka iz prethodnog pitanja, u kojem softveru je razvijena? *

☐ Excel

☐ Access

☐ Oracle

☐ Other: _____

Kako određujete vrijeme izrade i prodajnu cijenu izrade? *

☐ Temeljem iskustva

☐ Egzaktnim proračunom

☐ Other: _____

Možete li za svaki proizvod definirati sve elemente troška izrade, vremena izrade?

*

☐ DA

☐ NE

Kako bi automatizacija utjecala na unapređenje Vašeg odjela projektiranja tehnoloških procesa? *

- ☐ Povećala bi se produktivnost tehnologa
- ☐ Smanjio bi se postotak pogrešne procjene vremena i troška izrade
- ☐ Smanjili bi se mogući gubici zbog učinjenih grešaka pri procjeni vremena/troška izrade

Postoje li arhivirana potrebna vremena izrade (pomoćna i pripremno-završna vremena)? *

- ☐ DA
- ☐ NE

Dobivate li povratnu informaciju o kvaliteti proizvoda od strane kupca? *

- ☐ DA
- ☐ NE

Jeste li razmišljali o automatizaciji odjela tehnološke pripreme? *

- ☐ DA
- ☐ NE

Koliki je utjecaj subjektivnosti projektanta u projektiranju tehnoloških procesa? *

	1	2	3	4	5	
Mali	☐	☐	☐	☐	☐	Veliki

Kolika je vaša povezanost s odjelom konstrukcije? *

	1	2	3	4	5	
Mala	☐	☐	☐	☐	☐	Velika

Kolika je povezanost odjela tehnološke pripreme s odjelom planiranja proizvodnje? *

	1	2	3	4	5	
Mala	☐	☐	☐	☐	☐	Velika

Kako biste ocijenili softversku povezanost s ostalim odjelima unutar poduzeća? *

	1	2	3	4	5	
Loše	☐	☐	☐	☐	☐	Odlično

Kako biste ocijenili softversku povezanost s dobavljačima? *

	1	2	3	4	5	
Loše	☐	☐	☐	☐	☐	Odlično

Kako biste ocijenili softversku povezanost s kupcima? *

	1	2	3	4	5	
Loše	☐	☐	☐	☐	☐	Odlično

Kako biste ocijenili trenutnu internetsku infrastrukturu unutar poduzeća? *

	1	2	3	4	5	
Loše	☐	☐	☐	☐	☐	Odlično

Kako biste ocijenili funkcionalost hardvera koji koristite za rad? *

	1	2	3	4	5	
Loše	☐	☐	☐	☐	☐	Odlično

Koristite li metode prediktivne analitike kod projektiranja tehnoloških procesa? *

☐ Da

☐ Ne

Kako biste ocijenili mogućnosti vlastite fleksibilnosti u projektiranju tehnološkog procesa? *

	1	2	3	4	5	
Loše	☐	☐	☐	☐	☐	Odlično

Kako biste ocijenili fleksibilnost dostupnog softvera koji koristite za rad?

	1	2	3	4	5	
Loše	☐	☐	☐	☐	☐	Odlično

Kako biste ocijenili vlastitu mogućnost utjecaja na promjene s ciljem unapređenja unutar poduzeća? *

	1	2	3	4	5	
Loše	☐	☐	☐	☐	☐	Odlično

Koristite li interne društvene mreže za komunikaciju s drugim odjelima? *

☐ Da

☐ Ne

Kako biste ocijenili kvalitetu mogućnosti komunikacije i suradnje s ostalim odjelima u poduzeću? *

	1	2	3	4	5	
Loše	☐	☐	☐	☐	☐	Odlično

Kako biste ocijenili vlastitu zainteresiranost i motivaciju za unapređenje principa vlastitog rada? *

	1	2	3	4	5	
Loše	☐	☐	☐	☐	☐	Odlično

Koliko je poduzeće u kojem radite organizacijski centralizirano? *

	1	2	3	4	5	
Malo	☐	☐	☐	☐	☐	Iznimno

Koliko je odjel u kojem radite organizacijski centraliziran? *

	1	2	3	4	5	
Malo	☐	☐	☐	☐	☐	Iznimno

Kako biste ocijenili dostupne softverske kapacitete za trenutni rad i željeno buduće stanje poduzeća? *

	1	2	3	4	5	
Loše	☐	☐	☐	☐	☐	Odlično

Kako biste ocijenili dostupne hardverske kapacitete za trenutni rad i željeno buduće stanje poduzeća? *

	1	2	3	4	5	
Loše	☐	☐	☐	☐	☐	Odlično

Poredajte sljedeće karakteristike poduzeća prema prioritetnosti za unapređenje te na prvo mjesto stavite segment koji je najvažniji za unapređenje, a na posljednji najmanje važan:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Povezanost softvera	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CAM	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CAD	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Održavanje softvera	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Kibernetско-fizički sustavi	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Kapacitet baza podataka	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fleksibilnost	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Potpora pri odlučivanju	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modularnost sustava	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Društvene mreže	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Mogućnost samostalne optimizacije sustava	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

◀
▶

Poredajte sljedeće karakteristike poduzeća prema prioritetnosti za unapređenje te na prvo mjesto stavite segment koji je najvažniji za unapređenje, a na posljednji najmanje važan:

	1	2	3
Hardver	☐	☐	☐
Softver	☐	☐	☐
Organizacija i ljudski resursi	☐	☐	☐

Poredajte sljedeće karakteristike poduzeća prema prioritetnosti za unapređenje te na prvo mjesto stavite segment koji je najvažniji za unapređenje, a na posljednji najmanje važan:

	1	2	3	4	5	6	7
Povezanost hardvera	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Senzori	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Serveri	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Računalna infrastruktura	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fleksibilnost sustava	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Modularnost sustava	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Održavanje	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Poredajte sljedeće karakteristike poduzeća prema prioritetnosti za unapređenje te na prvo mjesto stavite segment koji je najvažniji za unapređenje, a na posljednji najmanje važan:

	1	2	3	4	5
Motivacija radnika	☐	☐	☐	☐	☐
Edukacija radnika	☐	☐	☐	☐	☐
Korištenje društvenih mreža	☐	☐	☐	☐	☐
Decentralizacija organizacijskih jedinica	☐	☐	☐	☐	☐
Komunikacija unutar organizacijskih jedinica	☐	☐	☐	☐	☐

Utječe li raspoloživost strojnog parka na projektiranje tehnološkog procesa? *

☐ DA

☐ NE

Savjetujete li se oko unapređenja odjela tehnološke pripreme? *

☐ DA

☐ NE

Odražavaju li se pogreške u tehnologiji na reklamacije proizvoda? *

☐ DA

☐ NE

Dobivate li uvid u reklamacije kupaca?

☐ DA

☐ NE

Koristite li lean alate? *

☐ DA

☐ NE

Ako DA, koje?

Your answer

Prihvaćate li inovativne ideje za unapređenje rada u projektiranju tehnoloških procesa? *

☐ DA

☐ NE

Koliko često mijenjate radni proces projektiranja tehnoloških procesa? *

	1	2	3	4	5	
Rijetko	☐	☐	☐	☐	☐	Vrlo često

Koristite li određen algoritam po kojem definirate tehnološki proces? *

☐ DA

☐ NE

Ako DA, koji?

Your answer

Mijenja li se ponekad redoslijed operacija u samom procesu proizvodnje, ukoliko dođe do nedostupnosti stroja? *

☐ DA

☐ NE

Kako bi automatizacija, prema Vašem mišljenju, utjecala na unapređenje odjela tehnološke pripreme?

Your answer

Prilog 2 Mann Whitney U-test uzoraka prema skupinama**Tablica 20 Mann-Whitney U-test prema poznavanju Industrije 4.0**

Pitanje	DA	NE	p	H
6. U radu unutar vlastitog odjela, koliko često izmjenjujete informacije s drugim odjelima?	[3 4 5 5 5 5 4 5 5 5 4 4 1 5 2 3]	[5 5 4 4 5 5 4 5 5 5 5 4 1 5 4 3 5 3]	0,6499	0
21. Koliki je utjecaj subjektivnosti projekatana u projektiranju tehnoloških procesa?	[4 3 4 4 5 2 5 3 4 4 4 4 3 3 5 3]	[4 3 2 3 4 3 4 4 3 4 4 4 1 3 4 3 2 3]	0,1202	0
27. Kako biste ocijenili trenutnu internetsku infrastrukturu unutar tvrtke?	[2 5 5 4 3 3 5 4 2 4 3 3 2 4 2 4]	[2 5 2 4 5 5 3 5 4 4 3 3 1 5 4 4 5 3]	0,4123	0
30. Kako biste ocijenili mogućnosti vlastite fleksibilnosti u projektiranju tehnoloških procesa?	[4 3 5 4 3 4 5 4 5 5 4 3 3 4 2 5]	[4 5 4 3 5 5 3 4 4 3 3 5 3 3 4 3 5 5]	0,9565	0
32. Kako biste ocijenili vlastitu mogućnost utjecaja na promjene s ciljem unapređenja unutar tvrtke?	[5 3 4 4 3 4 5 4 5 5 5 3 3 4 3 5]	[5 4 3 4 5 5 4 4 2 4 2 3 1 3 5 4 4 5]	0,5033	0
35. Kako biste ocijenili vlastitu zainteresiranost i motivaciju za unapređenje principa vlastitoga rada?	[4 5 5 4 4 4 5 5 5 5 5 4 5 4 4 5]	[5 5 4 4 4 5 4 5 5 5 5 5 4 4 5 4 5 5]	0,7926	0
38. Kako biste ocijenili dostupne softverske kapacitete za trenutni rad i željeno buduće stanje tvrtke?	[4 3 3 5 3 3 4 5 3 4 3 4 3 4 2 4]	[1 4 2 3 4 5 2 3 4 5 3 3 1 4 4 3 5 3]	0,5744	0
39. Kako biste ocijenili dostupne hardverske kapacitete za trenutni rad i željeno buduće stanje tvrtke?	[4 3 5 5 3 3 5 4 2 4 3 4 2 4 4 3]	[1 5 2 3 4 5 2 4 5 4 5 4 2 3 4 3 5 3]	0,9999	0
51. Koliko često mijenjate radne aktivnosti projektiranja tehnoloških procesa?	[2 3 4 5 3 2 5 3 2 4 3 3 3 3 2 2]	[3 5 2 2 5 2 4 3 2 3 4 3 1 2 3 2 2 5]	0,6508	0

Tablica 21 Mann-Whitney U-test prema veličini tvrtke

Pitanje	Male, srednje i velika tvrtke	Mikro tvrtka i obrt	p	H
6. U radu unutar vlastitog odjela, koliko često izmjenjujete informacije s drugim odjelima?	[4 5 5 5 5 2 4 5 5 4 5 5 5 5]	[5 5 4 3 5 4 5 4 3 5 4 5 5 1 4 3 4 1]	0,0455	1
21. Koliki je utjecaj subjektivnosti projektanata u projektiranju tehnoloških procesa?	[3 4 3 3 4 3 5 5 2 3 3 4 4 4 4]	[4 2 4 3 3 4 5 2 3 3 4 4 4 1 4 4 4 3]	0,7124	0
27. Kako biste ocijenili trenutnu internetsku infrastrukturu unutar tvrtke?	[5 4 5 5 3 5 2 5 3 4 4 5 5 4 5]	[4 5 4 3 4 3 3 2 4 4 3 2 2 1 3 2 3 2]	0,0017	1
30. Kako biste ocijenili mogućnosti vlastite fleksibilnosti u projektiranju tehnoloških procesa?	[3 4 5 5 3 3 2 5 4 4 3 4 5 5 5]	[3 5 4 5 4 3 3 4 3 4 5 5 4 3 4 4 3 3]	0,5292	0
32. Kako biste ocijenili vlastitu mogućnost utjecaja na promjene s ciljem unapređenja unutar tvrtke?	[3 4 4 5 2 3 3 5 4 2 4 4 4 5 5]	[4 4 5 5 4 4 3 3 4 4 3 5 5 1 5 5 3 3]	0,7618	0
35. Kako biste ocijenili vlastitu zainteresiranost i motivaciju za unapređenje principa vlastitoga rada?	[5 4 5 5 5 4 4 5 4 5 4 5 5 5 4]	[5 5 5 5 4 4 4 4 4 5 5 5 5 4 5 4 4 5]	0,8164	0
38. Kako biste ocijenili dostupne softverske kapacitete za trenutni rad i željeno buduće stanje tvrtke?	[3 5 4 5 3 4 2 4 3 4 3 3 3 4 4]	[5 5 4 3 4 2 3 2 3 5 3 3 1 1 3 4 4 3]	0,3724	0
39. Kako biste ocijenili dostupne hardverske kapacitete za trenutni rad i željeno buduće stanje tvrtke?	[3 5 5 5 5 3 4 5 3 5 3 4 5 4 4]	[4 5 4 3 4 2 3 2 3 4 4 2 1 2 3 4 4 2]	0,0063	1
51. Koliko često mijenjate radne aktivnosti projektiranja tehnoloških procesa?	[3 5 5 2 4 2 2 5 2 2 2 3 4 4 5]	[3 2 3 5 3 4 3 2 2 3 3 2 3 1 3 2 3 3]	0,3063	0

Tablica 22 Mann-Whitney U-test prema razini obrazovanja

Pitanje	VSS, VŠS	SSS	p	H
6. U radu unutar vlastitog odjela, koliko često izmjenjujete informacije s drugim odjelima?	[4 5 5 2 5 5 5 5 5 4 5 4 4 3 5 4 5 4 5 5 1 5]	[3 4 3 4 5 1 4 5 5 5 3 5]	0,2686	0
21. Koliki je utjecaj subjektivnosti projekatnata u projektiranju tehnoloških procesa?	[3 4 3 5 3 4 4 4 4 4 4 4 3 3 4 5 2 4 3 5 3 4]	[3 2 3 4 4 1 4 3 3 2 4 3]	0,0369	1
27. Kako biste ocijenili trenutnu internetsku infrastrukturu unutar tvrtke?	[5 3 5 2 4 5 4 5 4 3 5 3 4 4 4 5 3 4 4 3 2 2]	[3 2 4 3 2 1 3 5 5 5 2 4]	0,2724	0
30. Kako biste ocijenili mogućnosti vlastite fleksibilnosti u projektiranju tehnoloških procesa?	[3 3 3 2 4 4 5 5 3 4 5 3 3 5 4 5 4 4 4 3 3 4]	[5 4 3 5 5 3 3 5 5 5 4 4]	0,1434	0
32. Kako biste ocijenili vlastitu mogućnost utjecaja na promjene s ciljem unapređenja unutar tvrtke?	[3 2 3 3 2 4 5 5 4 5 4 4 4 5 4 5 4 5 4 3 3 5]	[5 3 4 3 5 1 3 4 5 4 5 4]	0,9999	0
35. Kako biste ocijenili vlastitu zainteresiranost i motivaciju za unapređenje principa vlastitoga rada?	[5 5 4 4 5 5 5 4 5 5 5 4 4 5 4 5 4 5 4 4 5 5]	[5 4 4 5 5 4 4 5 5 5 4 5]	0,9831	0
38. Kako biste ocijenili dostupne softverske kapacitete za trenutni rad i željeno buduće stanje tvrtke?	[3 3 4 2 4 3 4 4 5 3 3 2 3 4 5 4 3 4 4 3 3 1]	[3 2 3 3 3 1 4 4 5 5 4 5]	0,6772	0
39. Kako biste ocijenili dostupne hardverske kapacitete za trenutni rad i željeno buduće stanje tvrtke?	[3 5 3 4 5 4 4 4 4 3 5 2 3 3 5 5 3 4 4 3 2 1]	[3 2 3 4 2 2 4 5 5 5 4 4]	0,9999	0
51. Koliko često mijenjate radne aktivnosti projektiranja tehnoloških procesa?	[3 4 2 2 2 3 4 5 3 3 4 4 2 2 5 5 2 3 3 3 3 3]	[5 2 2 3 2 1 3 5 2 2 2 3]	0,121	0

Prilog 3 Anketa „Digitalizacija projektiranja tehnoloških procesa“

Digitalizacija projektiranja tehnoloških procesa -Z

Poštovani,

budući da je Vaš znanstveni rad blizak s ovim područjem, odabrani ste kao član ekspertne skupine, stoga Vas molim ispunite anketu u nastavku.

Radi se o istraživanju čiji će se rezultati koristiti u sklopu izradi mog Doktorskog rada "Model izračuna faktora spremnosti za Industriju 4.0 usmjerenoga na projektiranje tehnoloških procesa".

Za rješavanje ankete potrebno je 10-ak minuta.

Unaprijed Vam se zahvaljujem i srdačno Vas pozdravljam,
Maja Trstenjak, mag.ing.mech.
maja.trstenjak@fsb.hr

* Required

Ime i prezime *

Your answer

Naziv ustanove u kojoj ste zaposleni *

Your answer

Godine iskustva u znanstvenom području *

Your answer

Ocijenite od 1 (nikakvo) do 9 (izuzetno veliko) kakav bi UTJECAJ NA PRODUKTIVNOST imalo uvođenje navedenog elementa digitalizacije u poduzeće

*

	1 (nikakvo)	2	3	4	5 (umjereno)	6	7	8
CAD	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CAM	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Optimizacija iskoristivosti alata	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Automatska definicija plana izrade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Standardizacija procesa projektiranja	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Minimizacija subjektivnosti planera	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Kontinuirano praćenje, optimizacija sustava i uvođenje novih tehnoloških trendova	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu u baze	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Arhiviranje svih podataka iz svakog plana izrade u baze	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Korištenje podataka iz baze pri definiciji novog plana izrade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Korištenje metoda prediktivne analitike	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Povezanost s vanjskim bazama podataka	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Manipulacija velikom količinom podataka (Big Data Manipulation)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Vrhunska računalna infrastruktura	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fleksibilna i modularna hardverska rješenja	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fleksibilna i modularna softverska rješenja	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Vrhunska internetska infrastruktura dostupna svima	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Cloud Computing - odvijanje procesa obrade podataka online	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
ERP sustavi	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Visoka sigurnost mreže i podataka	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Prediktivno održavanje hardvera i softvera	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Vrhunska povezanost sa svima u lancu vrijednosti	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Posebni i visokoučinkoviti komunikacijski kanali (društvene mreže)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Decentralizacija odjela i poduzeća	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Visoka motivacija svakog radnika	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Spremnost radnika na promjene	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Visoka inovativnost radnika	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Prihvatanje principa cjeloživotnog učenja	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Prihvatanje principa kontinuiranog unapređenja (lean, kaizen)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Horizontalna i vertikalna integracija	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Ocijenite od 1 (nikakvo) do 9 (izuzetno veliko) kakav bi UTJECAJ NA KVALITETU imalo uvođenje navedenog elementa digitalizacije u poduzeće *

	1 (nikakvo)	2	3	4	5 (umjereno)	6	7	8
CAD	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CAM	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Optimizacija iskoristivosti alata	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatska definicija plana izrade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Ocijenite od 1 (nikakva) do 9 (jako velika) SPREMNOST FINANCIJSKOG
ULAGANJA u navedeni element digitalizacije *

	1 (nikakva)	2	3	4	5 (umjerena)	6	7	8
CAD	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CAM	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Optimizacija iskoristivosti alata	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatska definicija plana izrade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Minimizacija subjektivnosti planera	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Kontinuirano praćenje, optimizacija sustava i uvođenje novih tehnoloških trendova	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu u baze	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Arhiviranje svih podataka iz svakog plana izrade u baze	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Korištenje podataka iz baze pri definiciji novog plana izrade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Korištenje metoda prediktivne analitike	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Povezanost s vanjskim bazama podataka	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Manipulacija velikom količinom podataka (Big Data Manipulation)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Vrhunska računalna infrastruktura	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Fleksibilna i modularna hardverska rješenja	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fleksibilna i modularna softverska rješenja	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Vrhunska internetska infrastruktura dostupna svima	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Cloud Computing - odvijanje procesa obrade podataka online	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
ERP sustavi	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Visoka sigurnost mreže i podataka	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Prediktivno održavanje hardvera i softvera	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Vrhunska povezanost sa svima u lancu vrijednosti	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Posebni i visokoučinkoviti komunikacijski kanali (društvene mreže)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Decentralizacija odjela i poduzeća	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Ocijenite od 1 (zanemarivo mala) do 9 (jako velika) SLOŽENOST IZVEDBE I
PRIMJENE navedenog elementa digitalizacije u poduzeću *

	1 (zanemarivo mala)	2	3	4	5 (umjerena)	6	7	8	9
CAD	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CAM	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Optimizacija iskoristivosti alata	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Ocijenite od 1 (zanemarivo malo) do 9 (jako veliko) OČEKIVANO VRIJEME POVRATA INVESTICIJE za uvođenje navedenog elementa digitalizacije u poduzeće *

	1 (zanemarivo malo)	2	3	4	5 (umjereno)	6	7	8	9 (jako veliko)
CAD	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CAM	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Prilog 4 Obrada podataka i ponderiranje - „Digitalizacija projektiranja tehnoloških procesa“

Tablica 23 Skupina elemenata „Pametno projektiranje tehnoloških procesa“ prema kriteriju povećanja produktivnosti

	Prosječni rang	Suma rangova	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Ponder
CAD	8,4667	254,0000	7,2667	1,5522	0,1085
CAM	8,1667	245,0000	6,8000	2,2034	0,1047
Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda	5,9500	178,5000	6,1000	2,0736	0,0763
Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija	6,8333	205,0000	6,3000	2,1197	0,0876
Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.	6,5833	197,5000	6,0667	2,1961	0,0844
Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade	7,2833	218,5000	6,7000	1,7050	0,0934
Optimizacija iskoristivosti alata	5,9000	177,0000	6,1333	1,7953	0,0756
Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva	6,3000	189,0000	6,4000	1,4762	0,0808
Automatska definicija plana izrade	4,7833	143,5000	5,6000	1,9226	0,0613
Standardizacija aktivnosti projektiranja	5,8500	175,5000	6,2667	1,6174	0,0750
Minimizacija subjektivnosti tehnologa	4,4167	132,5000	5,4667	2,0965	0,0566
Kontinuirano praćenje, optimizacija sustava i uvođenje novih tehnoloških trendova	7,4667	224,0000	6,6333	1,6501	0,0957
Σ	78,0000				1,0000

Tablica 24 Skupina elemenata „Infrastruktura“ prema kriteriju povećanja produktivnosti

	Prosječni rang	Suma rangova	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Ponder
Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu u baze	9,0167	270,5000	6,6667	1,7287	0,0859
Arhiviranje svih podataka iz svakog plana izrade u baze	8,1833	245,5000	6,4000	1,7340	0,0779
Korištenje podataka iz baze pri definiciji novog plana izrade	6,8667	206,0000	5,9667	2,2358	0,0654
Korištenje metoda prediktivne analitike	9,3500	280,5000	6,8000	1,6484	0,0890
Povezanost s vanjskim bazama podataka	5,9833	179,5000	5,7667	1,9772	0,0570
Manipulacija velikom količinom podataka (Big Data Manipulation)	6,4500	193,5000	5,9667	2,1413	0,0614
Vrhunska računalna infrastruktura	8,0167	240,5000	6,4333	2,0457	0,0763
Fleksibilna i modularna hardverska rješenja	7,6333	229,0000	6,2667	2,0160	0,0727
Fleksibilna i modularna softverska rješenja	9,0833	272,5000	6,7667	2,0457	0,0865
Vrhunska internetska infrastruktura dostupna svima	8,4500	253,5000	6,6000	1,7734	0,0805
Cloud Computing - odvijanje obrade podataka online	6,9833	209,5000	6,2000	1,9369	0,0665
ERP sustavi	6,4167	192,5000	5,7667	2,1121	0,0611
Visoka sigurnost mreže i podataka	6,7667	203,0000	5,8667	2,0466	0,0644
Prediktivno održavanje hardvera i softvera	5,8000	174,0000	5,6333	2,3265	0,0552
Σ	105,0000				1,0000

Tablica 25 Skupina elemenata „Organizacija i ljudski resursi“ prema kriteriju povećanja produktivnost

	Prosječni rang	Suma rangova	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Ponder
Vrhunska povezanost sa svima u lancu vrijednosti	4,7000	141,0000	6,3000	1,8965	0,1044
Posebni i visokoučinkoviti komunikacijski kanali (društvene mreže)	2,9833	89,5000	4,9000	1,9713	0,0663
Decentralizacija odjela i tvrtke	2,9833	89,5000	4,7667	2,1284	0,0663
Visoka motivacija svakog radnika	5,9000	177,0000	6,9667	1,8096	0,1311
Spremnost radnika na promjene	5,7500	172,5000	6,9000	1,5391	0,1278
Visoka inovativnost radnika	6,0833	182,5000	7,0000	1,5974	0,1352
Prihvaćanje principa cjeloživotnog učenja	6,1500	184,5000	7,1000	1,4704	0,1367
Prihvaćanje principa kontinuiranog unapređenja (lean, kaizen)	5,6000	168,0000	6,8000	1,5625	0,1244
Horizontalna i vertikalna integracija	4,8500	145,5000	6,2333	1,7750	0,1078
Σ	45,0000				1,0000

Tablica 26 Skupina elemenata „Pametno projektiranje tehnoloških procesa“ prema kriteriju povećanja kvalitete

	Prosječan rang	Suma rangova	Srednja vrijednost	St. Devijacija	Ponder
CAD	8,0167	240,5000	6,9667	1,7711	0,1028
CAM	8,3333	250,0000	7,1000	1,8819	0,1068
Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda	6,3667	191,0000	5,9667	2,0924	0,0816
Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija	6,2000	186,0000	5,8667	2,0297	0,0795
Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.	5,5667	167,0000	5,5333	2,0466	0,0714
Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade	6,0500	181,5000	6,0000	1,9298	0,0776
Optimizacija iskoristivosti alata	6,6000	198,0000	6,1000	2,2796	0,0846
Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva	4,8167	144,5000	5,3667	2,5795	0,0618
Automatska definicija plana izrade	5,8833	176,5000	5,9000	2,2183	0,0754
Standardizacija aktivnosti projektiranja	6,6333	199,0000	6,2667	2,0500	0,0850
Minimizacija subjektivnosti tehnologa	6,4167	192,5000	6,2333	2,0288	0,0823
Kontinuirano praćenje, optimizacija sustava i uvođenje novih tehnoloških trendova	7,1167	213,5000	6,7000	1,7449	0,0912
Σ	78,0000				1,0000

Tablica 27 Skupina elemenata „Infrastruktura“ prema kriteriju povećanja kvalitete

	Prosječni rang	Suma rangova	Srednja vrijednost	St. devijacija	Ponder
Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu u baze	8,1167	243,5000	6,1333	2,3004	0,0773
Arhiviranje svih podataka iz svakog plana izrade u baze	8,3333	250,0000	6,0667	2,3034	0,0794
Korištenje podataka iz baze pri definiciji novog plana izrade	7,7667	233,0000	6,1333	2,2550	0,0740
Korištenje metoda prediktivne analitike	8,6167	258,5000	6,3000	2,2307	0,0821
Povezanost s vanjskim bazama podataka	6,9667	209,0000	5,8000	2,4551	0,0663
Manipulacija velikom količinom podataka (Big Data Manipulation)	9,2167	276,5000	6,5667	2,3589	0,0878
Vrhunska računalna infrastruktura	6,8167	204,5000	5,7333	2,4904	0,0649
Fleksibilna i modularna hardverska rješenja	8,1833	245,5000	6,3000	2,4516	0,0779
Fleksibilna i modularna softverska rješenja	7,9167	237,5000	6,1667	2,3793	0,0754
Vrhunska internetska infrastruktura dostupna svima	6,9500	208,5000	5,8000	2,6444	0,0662
Cloud Computing - odvijanje obrade podataka online	6,4833	194,5000	5,7333	2,4202	0,0617
ERP sustavi	6,4167	192,5000	5,7333	2,1162	0,0611
Visoka sigurnost mreže i podataka	6,1833	185,5000	5,7000	2,1838	0,0589
Prediktivno održavanje hardvera i softvera	7,0333	211,0000	5,6000	2,4997	0,0670
Σ	105,0000				1,0000

Tablica 28 Skupina elemenata „Organizacija i ljudski resursi“ prema kriteriju povećanja kvalitete

	Prosječan rang	Suma rangova	Srednja vrijednost	St. devijacija	Ponder
Vrhunska povezanost sa svima u lancu vrijednosti	4,4833	134,5000	5,9333	2,2118	0,0996
Posebni i visokoučinkoviti komunikacijski kanali (društvene mreže)	3,3833	101,5000	4,9000	2,3976	0,0752
Decentralizacija odjela i tvrtke	2,7500	82,5000	4,6333	2,1573	0,0611
Visoka motivacija svakog radnika	6,3833	191,5000	7,4667	1,3578	0,1419
Spremnost radnika na promjene	5,8500	175,5000	7,2000	1,0954	0,1300
Visoka inovativnost radnika	5,7833	173,5000	7,0667	1,7798	0,1285
Prihvatanje principa cjeloživotnog učenja	5,6833	170,5000	7,1000	1,3983	0,1263
Prihvatanje principa kontinuiranog unapređenja (lean, kaizen)	6,3667	191,0000	7,3667	1,6709	0,1415
Horizontalna i vertikalna integracija	4,3167	129,5000	6,1000	2,0401	0,0959
Σ	45,0000				1,0000

Tablica 29 Skupina elemenata „Pametno projektiranje tehnoloških procesa“ prema kriteriju spremnosti financijskog ulaganja

	Prosječan rang	Suma rangova	Srednja vrijednost	St. Devijacija	Ponder
CAD	8,5333	256,0000	6,3000	1,9325	0,1094
CAM	7,7667	233,0000	5,9000	1,9538	0,0996
Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda	4,9333	148,0000	4,6000	2,2376	0,0632
Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija	5,3667	161,0000	4,8000	2,3983	0,0688
Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.	6,6167	198,5000	5,3667	2,2512	0,0848
Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade	6,8833	206,5000	5,4333	2,1121	0,0882
Optimizacija iskoristivosti alata	4,7333	142,0000	4,5667	2,1445	0,0607
Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva	7,0333	211,0000	5,5333	2,3302	0,0902
Automatska definicija plana izrade	6,8667	206,0000	5,4000	2,2066	0,0880
Standardizacija aktivnosti projektiranja	6,8167	204,5000	5,4000	2,4858	0,0874
Minimizacija subjektivnosti tehnologa	4,9500	148,5000	4,7000	2,2766	0,0635
Kontinuirano praćenje, optimizacija sustava i uvođenje novih tehnoloških trendova	7,5000	225,0000	5,6000	2,5811	0,0962
Σ	78,0000				1,0000

Tablica 30 Skupina elemenata „Infrastruktura“ prema kriteriju spremnosti financijskog ulaganja

	Prosječan rang	Suma rangova	Srednja vrijednost	St. devijacija	Ponder
Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu u baze	8,4333	253,0000	5,4667	2,1613	0,0803
Arhiviranje svih podataka iz svakog plana izrade u baze	8,1500	244,5000	5,3667	2,2358	0,0776
Korištenje podataka iz baze pri definiciji novog plana izrade	8,2667	248,0000	5,3333	2,2024	0,0787
Korištenje metoda prediktivne analitike	6,9167	207,5000	4,7667	2,6611	0,0659
Povezanost s vanjskim bazama podataka	6,9000	207,0000	5,0667	2,3034	0,0657
Manipulacija velikom količinom podataka (Big Data Manipulation)	6,1167	183,5000	4,6667	2,4259	0,0583
Vrhunska računalna infrastruktura	7,7167	231,5000	5,2667	2,4766	0,0735
Fleksibilna i modularna hardverska rješenja	7,4833	224,5000	4,9333	2,5316	0,0713
Fleksibilna i modularna softverska rješenja	8,2667	248,0000	5,2667	2,3034	0,0787
Vrhunska internetska infrastruktura dostupna svima	8,2000	246,0000	5,3333	2,3829	0,0781
Cloud Computing - odvijanje obrade podataka online	8,0333	241,0000	5,1667	2,5875	0,0765
ERP sustavi	6,1167	183,5000	4,7000	2,4233	0,0583
Visoka sigurnost mreže i podataka	6,3833	191,5000	4,7667	2,3735	0,0608
Prediktivno održavanje hardvera i softvera	8,0167	240,5000	5,1667	2,2141	0,0763
Σ	105,0000				1,0000

Tablica 31 Skupina elemenata „Organizacija i ljudski resursi“ prema kriteriju spremnosti financijskog ulaganja

	Prosječan rang	Suma rangova	Srednja vrijednost	St. Devijacija	Ponder
Vrhunska povezanost sa svima u lancu vrijednosti	5,1000	153,0000	5,1000	2,2183	0,1133
Posebni i visokoučinkoviti komunikacijski kanali (društvene mreže)	4,1667	125,0000	4,7333	2,2427	0,0926
Decentralizacija odjela i tvrtke	3,6167	108,5000	4,3667	1,9911	0,0804
Visoka motivacija svakog radnika	5,2000	156,0000	5,3000	2,7057	0,1156
Spremnost radnika na promjene	6,3667	191,0000	5,8000	2,2804	0,1415
Visoka inovativnost radnika	5,3167	159,5000	5,4333	2,6997	0,1181
Prihvaćanje principa cjeloživotnog učenja	5,6167	168,5000	5,5667	2,6481	0,1248
Prihvaćanje principa kontinuiranog unapređenja (lean, kaizen)	5,3500	160,5000	5,3000	2,4375	0,1189
Horizontalna i vertikalna integracija	4,2667	128,0000	4,8333	2,3501	0,0948
Σ	45,0000				1,0000

Tablica 32 Skupina elemenata „Pametno projektiranje tehnoloških procesa“ prema kriteriju složenosti izvedbe i primjene

	Prosječan rang	Suma rangova	Srednja vrijednost	St. devijacija	Ponder
CAD	7,7500	232,5000	5,6333	1,9384	0,0994
CAM	7,9333	238,0000	5,5333	1,9780	0,1017
Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda	4,2667	128,0000	3,7667	1,8696	0,0547
Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija	6,0500	181,5000	4,2667	2,0500	0,0776
Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.	5,4833	164,5000	4,1333	2,0297	0,0703
Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade	6,5667	197,0000	4,5333	1,9605	0,0842
Optimizacija iskoristivosti alata	6,7333	202,0000	4,8667	1,9780	0,0863
Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva	7,3000	219,0000	4,8333	1,7237	0,0936
Automatska definicija plana izrade	6,1000	183,0000	4,2667	1,9815	0,0782
Standardizacija aktivnosti projektiranja	6,7667	203,0000	4,7667	1,7943	0,0868
Minimizacija subjektivnosti tehnologa	6,8500	205,5000	4,9333	1,8742	0,0878
Kontinuirano praćenje, optimizacija sustava i uvođenje novih tehnoloških trendova	6,2000	186,0000	4,5000	1,8892	0,0795
Σ	78,0000				1,0000

Tablica 33 Skupina elemenata „Infrastruktura“ prema kriteriju složenosti izvedbe i primjene

	Prosječan rang	Suma rangova	Srednja vrijednost	St. devijacija	Ponder
Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu u baze	7,9667	239,0000	4,5667	1,9945	0,0759
Arhiviranje svih podataka iz svakog plana izrade u baze	8,6833	260,5000	4,9667	2,1891	0,0827
Korištenje podataka iz baze pri definiciji novog plana izrade	7,6667	230,0000	4,3333	1,8068	0,0730
Korištenje metoda prediktivne analitike	7,0500	211,5000	4,1000	2,1711	0,0671
Povezanost s vanjskim bazama podataka	7,5167	225,5000	4,3667	2,0592	0,0716
Manipulacija velikom količinom podataka (Big Data Manipulation)	5,9000	177,0000	4,0000	2,3635	0,0562
Vrhunska računalna infrastruktura	6,8500	205,5000	4,1333	1,9780	0,0652
Fleksibilna i modularna hardverska rješenja	7,0167	210,5000	4,3000	1,8223	0,0668
Fleksibilna i modularna softverska rješenja	7,7833	233,5000	4,2667	1,6174	0,0741
Vrhunska internetska infrastruktura dostupna svima	8,4000	252,0000	4,6000	2,0443	0,0800
Cloud Computing - odvijanje obrade podataka online	7,8333	235,0000	4,4000	2,0103	0,0746
ERP sustavi	7,3167	219,5000	4,1667	2,0692	0,0697
Visoka sigurnost mreže i podataka	7,4833	224,5000	4,4667	1,9605	0,0713
Prediktivno održavanje hardvera i softvera	7,5333	226,0000	4,3667	2,2512	0,0717
Σ	105,0000				1,0000

Tablica 34 Skupina elemenata „Organizacija i ljudski resursi“ prema kriteriju složenosti izvedbe i primjene

	Prosječan rang	Suma rangova	Srednja vrijednost	St. devijacija	Ponder
Vrhunska povezanost sa svima u lancu vrijednosti	4,5667	137,0000	4,2667	1,8925	0,1015
Posebni i visokoučinkoviti komunikacijski kanali (društvene mreže)	6,6167	198,5000	6,0000	2,2283	0,1470
Decentralizacija odjela i tvrtke	5,1167	153,5000	4,8333	2,1186	0,1137
Visoka motivacija svakog radnika	5,3000	159,0000	4,7000	2,1520	0,1178
Spremnost radnika na promjene	4,0167	120,5000	4,2000	2,3401	0,0893
Visoka inovativnost radnika	4,1500	124,5000	4,2000	2,1075	0,0922
Prihvatanje principa cjeloživotnog učenja	5,0833	152,5000	4,7000	2,3511	0,1130
Prihvatanje principa kontinuiranog unapređenja (lean, kaizen)	5,2500	157,5000	4,7333	2,2884	0,1167
Horizontalna i vertikalna integracija	4,9000	147,0000	4,5000	2,2553	0,1089
Σ	45,0000				1,0000

Tablica 35 Skupina elemenata „Pametno projektiranje tehnoloških procesa“ prema kriteriju očekivano vrijeme povrata investicije

	Prosječan rang	Suma rangova	Srednja vrijednost	St. devijacija	Ponder
CAD	7,1000	213,0000	5,3333	2,3094	0,0910
CAM	6,4333	193,0000	5,0333	2,2358	0,0825
Automatsko prepoznavanje geometrijskih značajki proizvoda	5,7333	172,0000	4,6667	2,2335	0,0735
Automatski odabir tehnologija i redoslijeda operacija	5,5167	165,5000	4,7333	2,1485	0,0707
Automatski odabir alata, strojeva, steznih naprava i sl.	5,7167	171,5000	4,7000	2,1034	0,0733
Automatska definicija vremena izrade i troškova izrade	6,2667	188,0000	4,9000	2,0902	0,0803
Optimizacija iskoristivosti alata	7,1667	215,0000	5,4333	2,1922	0,0919
Optimizacija iskoristivosti (dostupnost i energetska učinkovitost) strojeva	6,1667	185,0000	4,9667	2,3413	0,0791
Automatska definicija plana izrade	6,3500	190,5000	4,9333	2,1485	0,0814
Standardizacija aktivnosti projektiranja	6,7833	203,5000	5,3667	2,2358	0,0870
Minimizacija subjektivnosti tehnologa	7,6500	229,5000	5,7333	2,1485	0,0981
Kontinuirano praćenje, optimizacija sustava i uvođenje novih tehnoloških trendova	7,1167	213,5000	5,2667	1,8557	0,0912
Σ	78,0000				1,0000

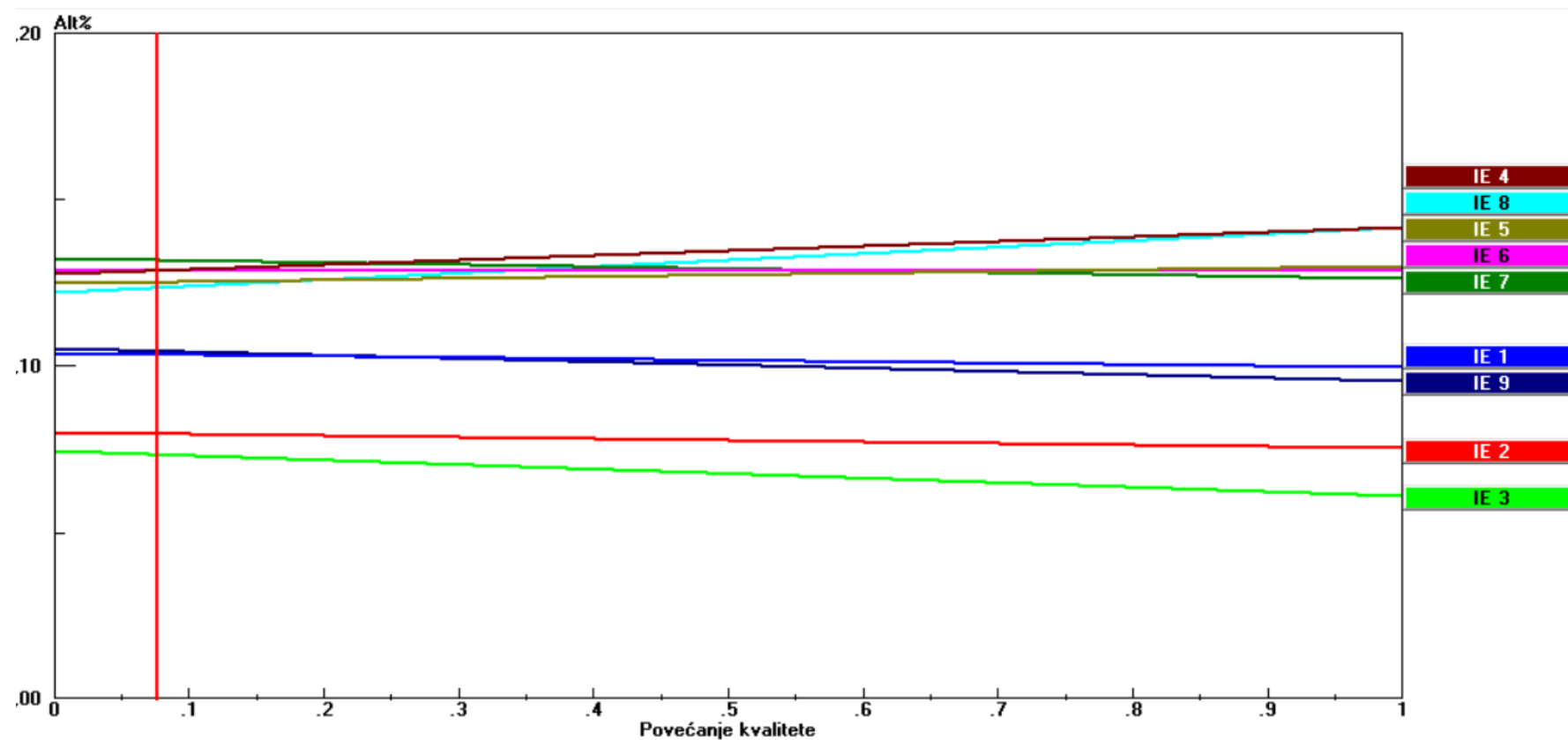
Tablica 36 Skupina elemenata „Infrastruktura“ prema kriteriju očekivano vrijeme povrata investicije

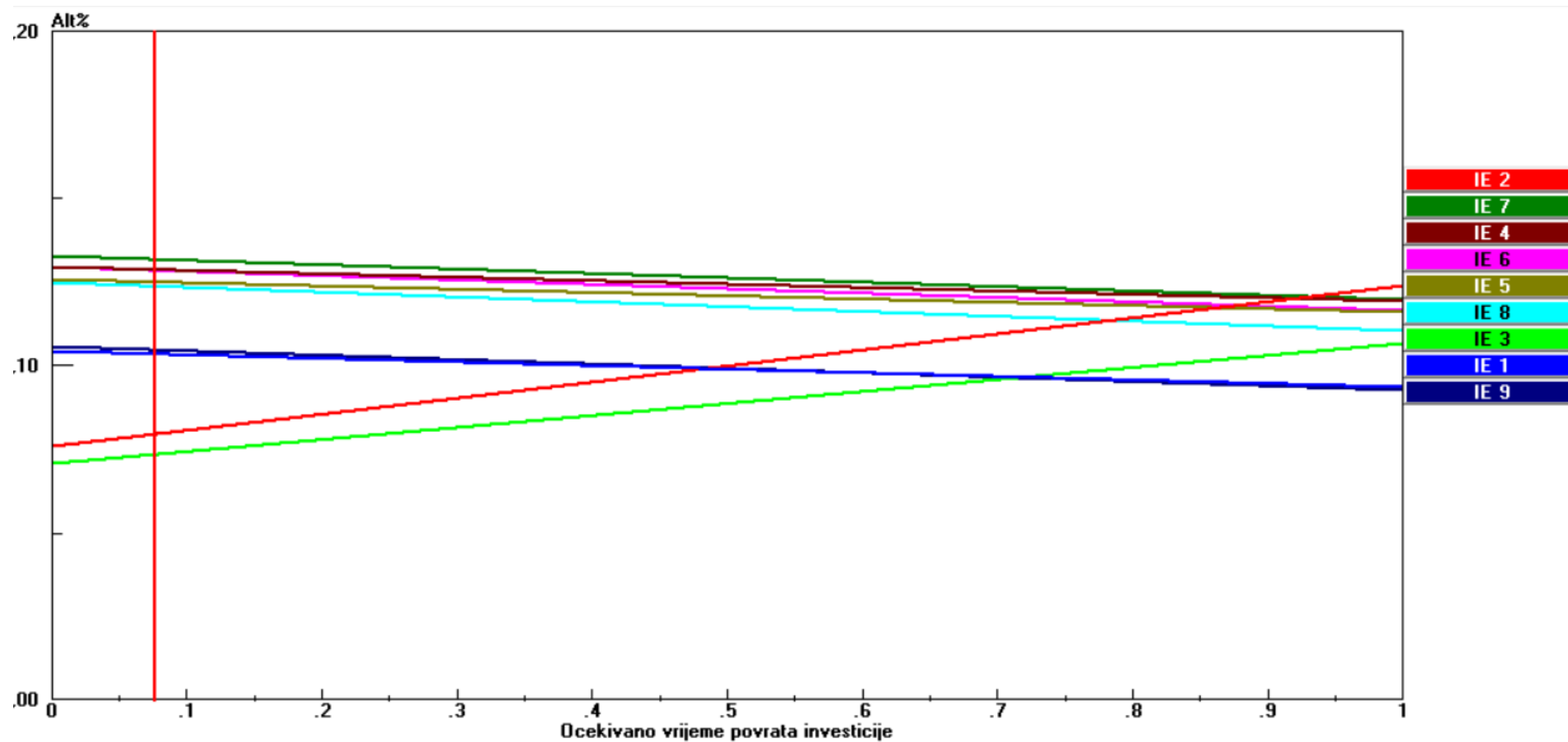
	Prosječan rang	Suma rangova	Srednja vrijednost	St. devijacija	Ponder
Prikupljanje podataka u stvarnom vremenu u baze	7,8000	234,0000	5,4000	1,7538	0,0743
Arhiviranje svih podataka iz svakog plana izrade u baze	8,1667	245,0000	5,4333	1,5906	0,0778
Korištenje podataka iz baze pri definiciji novog plana izrade	7,4000	222,0000	5,2667	1,8925	0,0705
Korištenje metoda prediktivne analitike	7,6833	230,5000	5,3333	1,8257	0,0732
Povezanost s vanjskim bazama podataka	6,3333	190,0000	4,8333	1,8585	0,0603
Manipulacija velikom količinom podataka (Big Data Manipulation)	7,6500	229,5000	5,1667	1,8210	0,0729
Vrhunska računalna infrastruktura	6,2500	187,5000	4,8000	1,9896	0,0595
Fleksibilna i modularna hardverska rješenja	7,3667	221,0000	5,0000	2,1009	0,0702
Fleksibilna i modularna softverska rješenja	7,2500	217,5000	5,0000	2,1335	0,0690
Vrhunska internetska infrastruktura dostupna svima	7,4333	223,0000	5,2000	2,1399	0,0708
Cloud Computing - odvijanje obrade podataka online	7,3833	221,5000	5,2667	2,0833	0,0703
ERP sustavi	8,3500	250,5000	5,3333	2,2024	0,0795
Visoka sigurnost mreže i podataka	8,3500	250,5000	5,4000	2,0103	0,0795
Prediktivno održavanje hardvera i softvera	7,5833	227,5000	5,3333	2,3829	0,0722
Σ	105,0000				1,0000

Tablica 37 Skupina elemenata „Organizacija i ljudski resursi“ prema kriteriju očekivano vrijeme povrata investicije

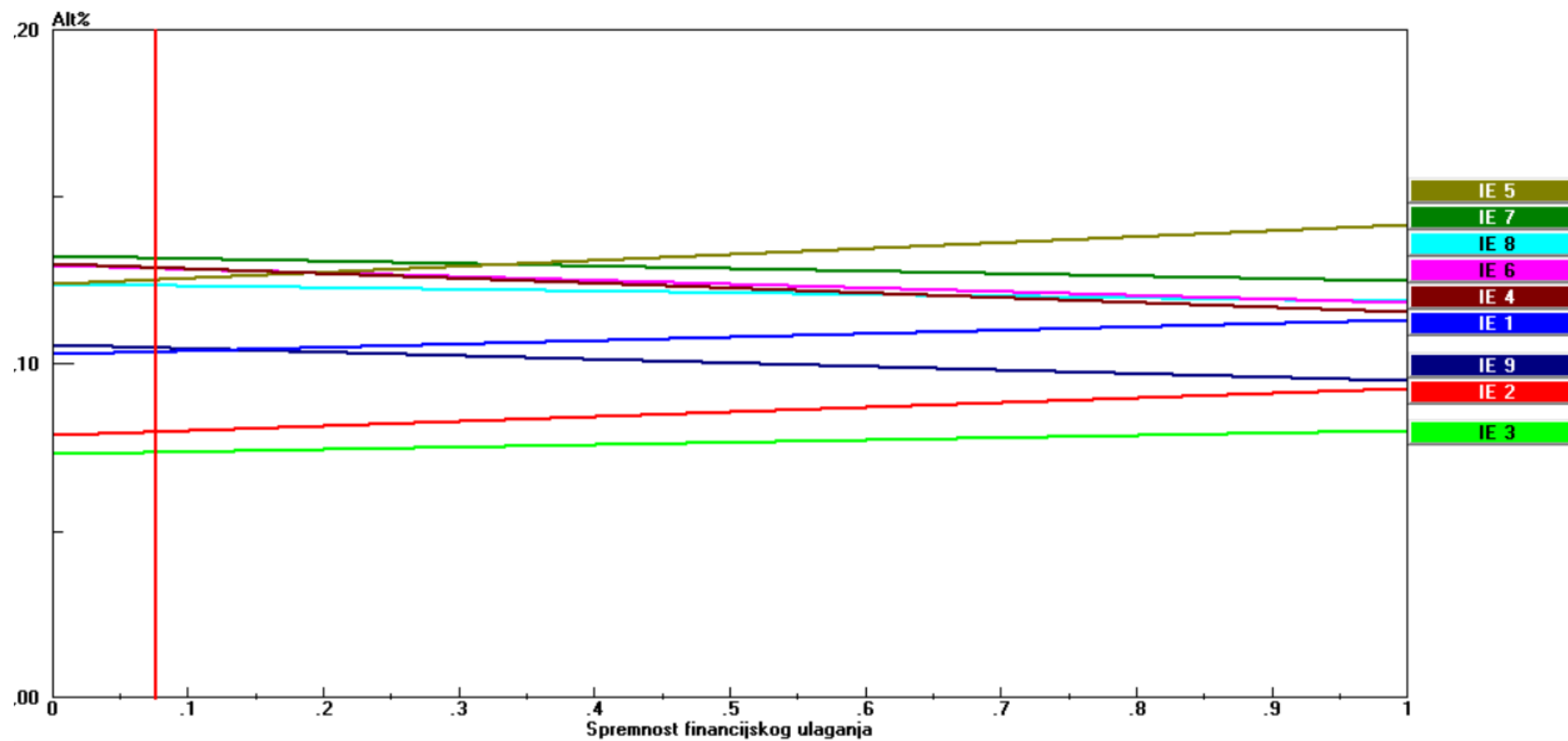
	Prosječan rang	Suma rangova	Srednja vrijednost	St. devijacija	Ponder
Vrhunska povezanost sa svima u lancu vrijednosti	4,2167	126,5000	5,3000	2,2152	0,0937
Posebni i visokoučinkoviti komunikacijski kanali (društvene mreže)	5,5833	167,5000	5,8000	2,3839	0,1241
Decentralizacija odjela i tvrtke	4,8167	144,5000	5,6667	2,0398	0,1070
Visoka motivacija svakog radnika	5,3667	161,0000	5,7667	2,5418	0,1193
Spremnost radnika na promjene	5,2333	157,0000	5,7333	2,2581	0,1163
Visoka inovativnost radnika	5,2500	157,5000	5,7000	2,2152	0,1167
Prihvatanje principa cjeloživotnog učenja	5,3833	161,5000	5,7000	2,3802	0,1196
Prihvatanje principa kontinuiranog unapređenja (lean, kaizen)	4,9667	149,0000	5,6333	2,3116	0,1104
Horizontalna i vertikalna integracija	4,1833	125,5000	5,3333	2,2489	0,0930
Σ	45,0000				1,0000

Prilog 5 Analiza osjetljivosti modela uvođenja elemenata Industrije 4.0 usmjerenog na projektiranje tehnoloških procesa

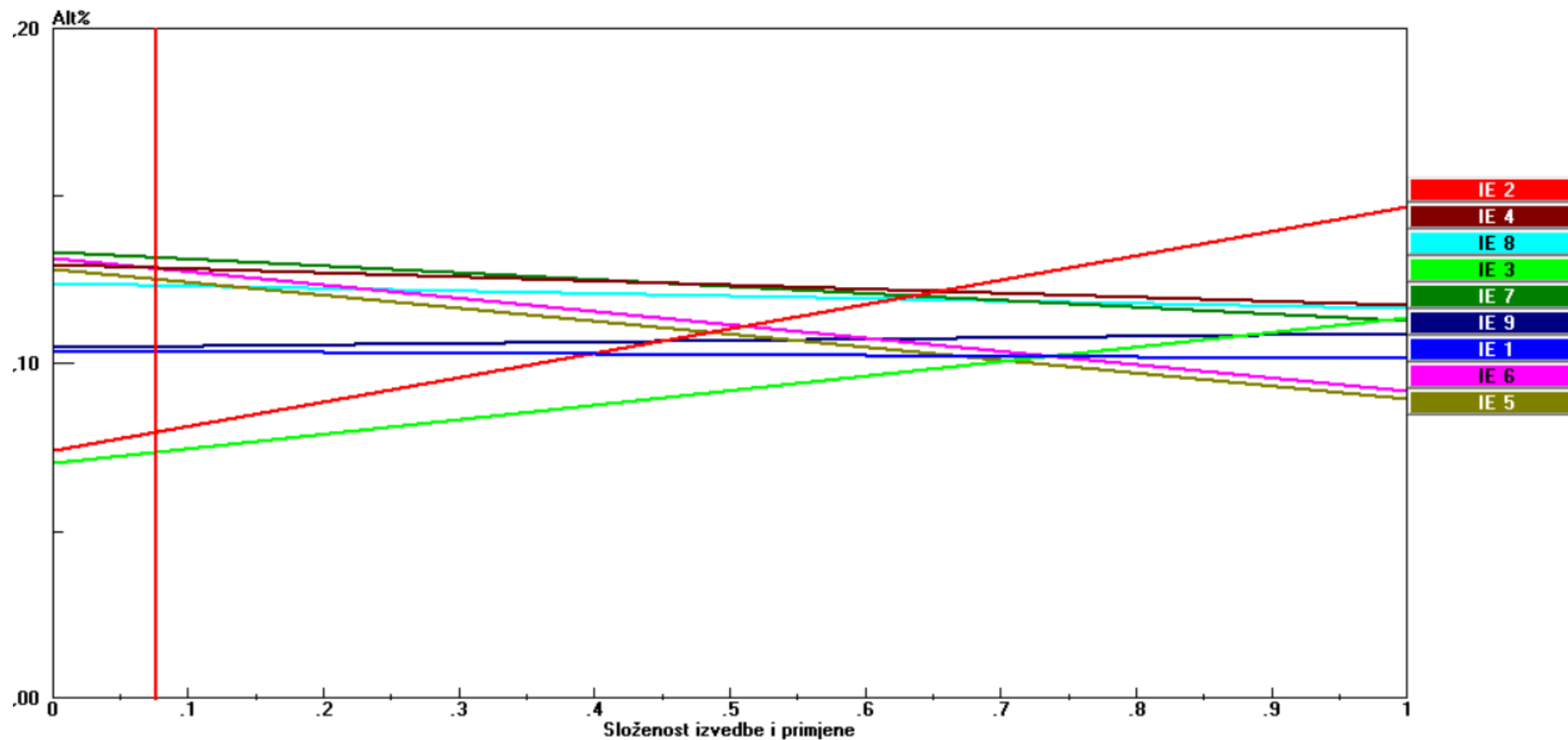
Slika 66 Opcija *gradient* s obzirom na kriterij „Povećanje kvalitete“ kod grupe „Organizacija i ljudski resursi“



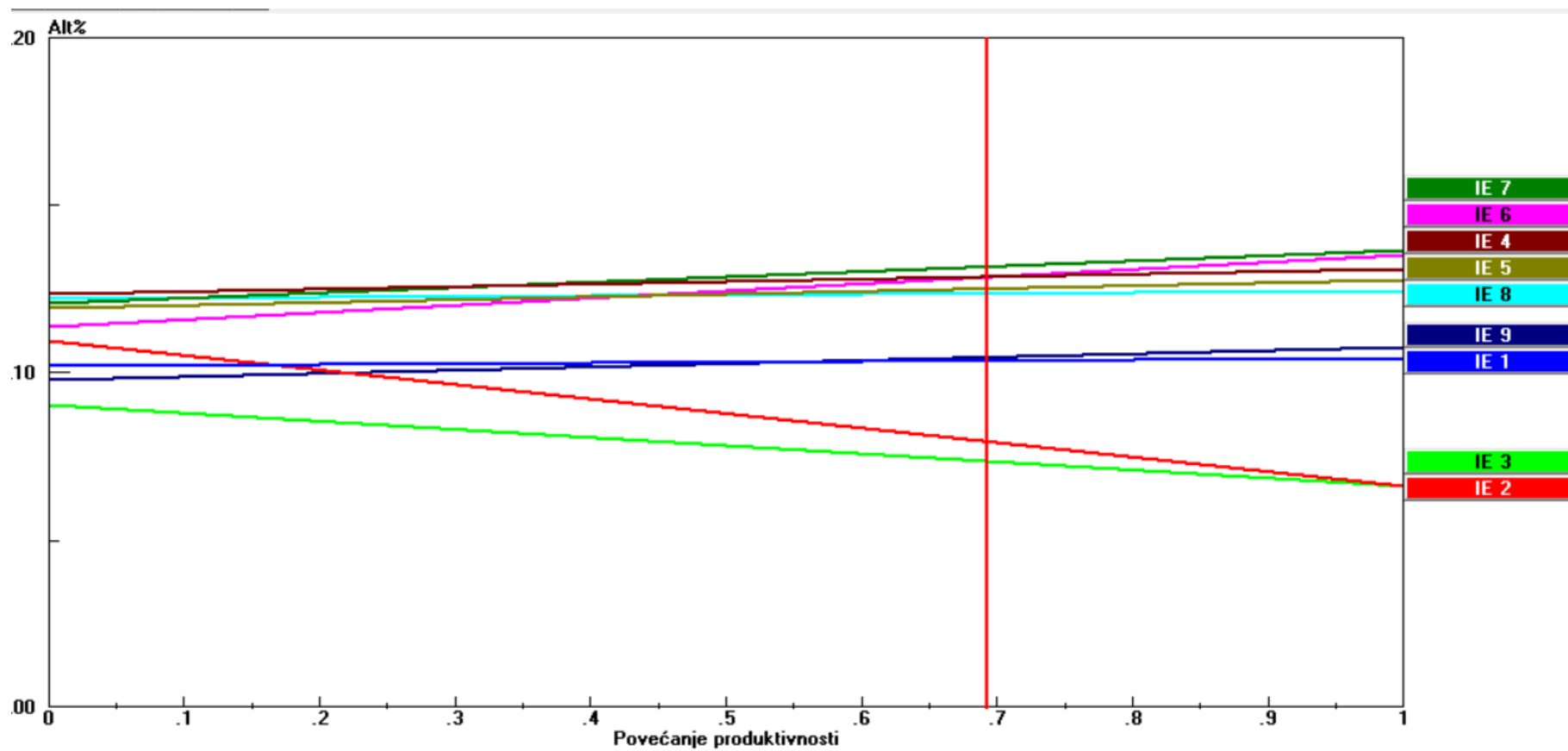
Slika 67 Opcija *gradient* s obzirom na kriterij „Očekivano vrijeme povrata investicije“ kod grupe „Organizacija i ljudski resursi“



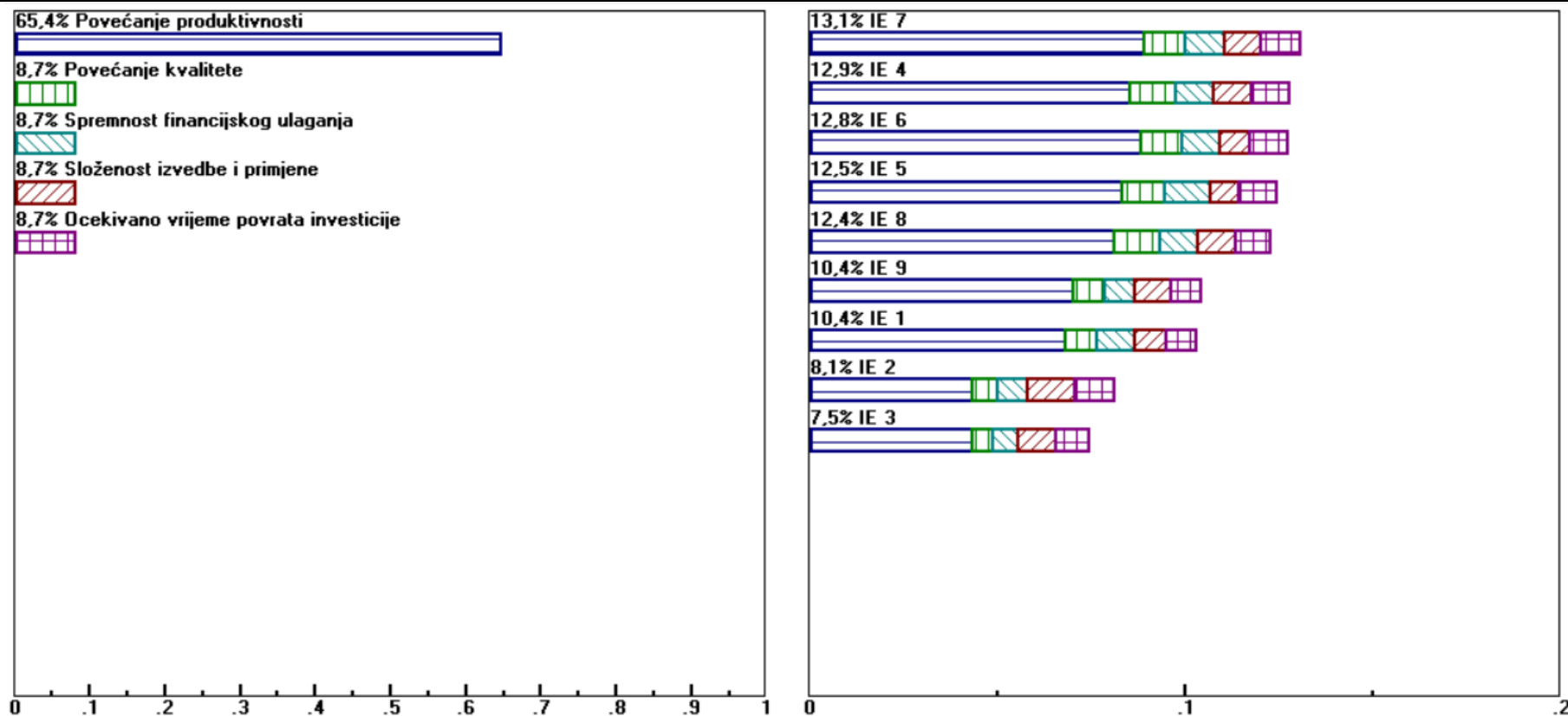
Slika 68 Opcija *gradient* s obzirom na kriterij „Spremnost financijskog ulaganja“ kod grupe „Organizacija i ljudski resursi“

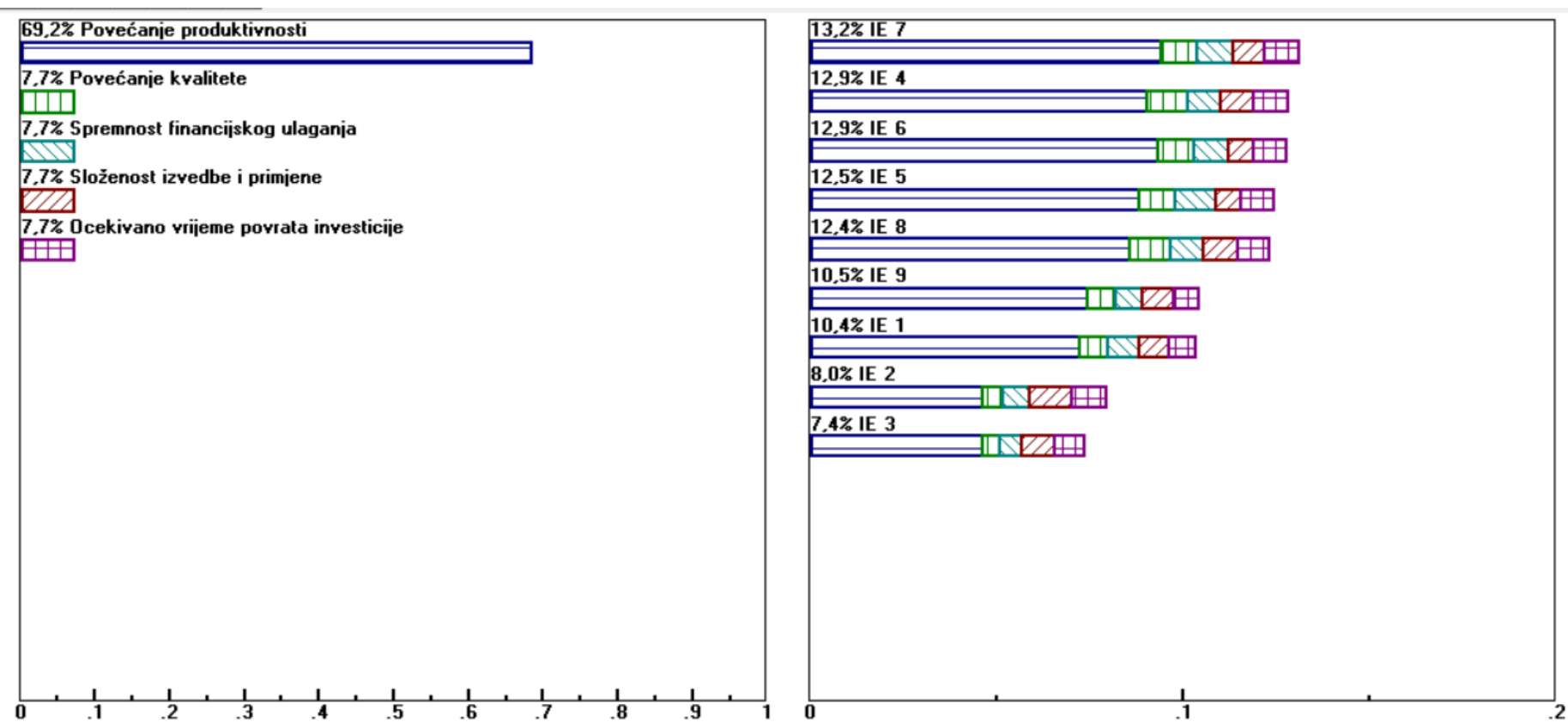


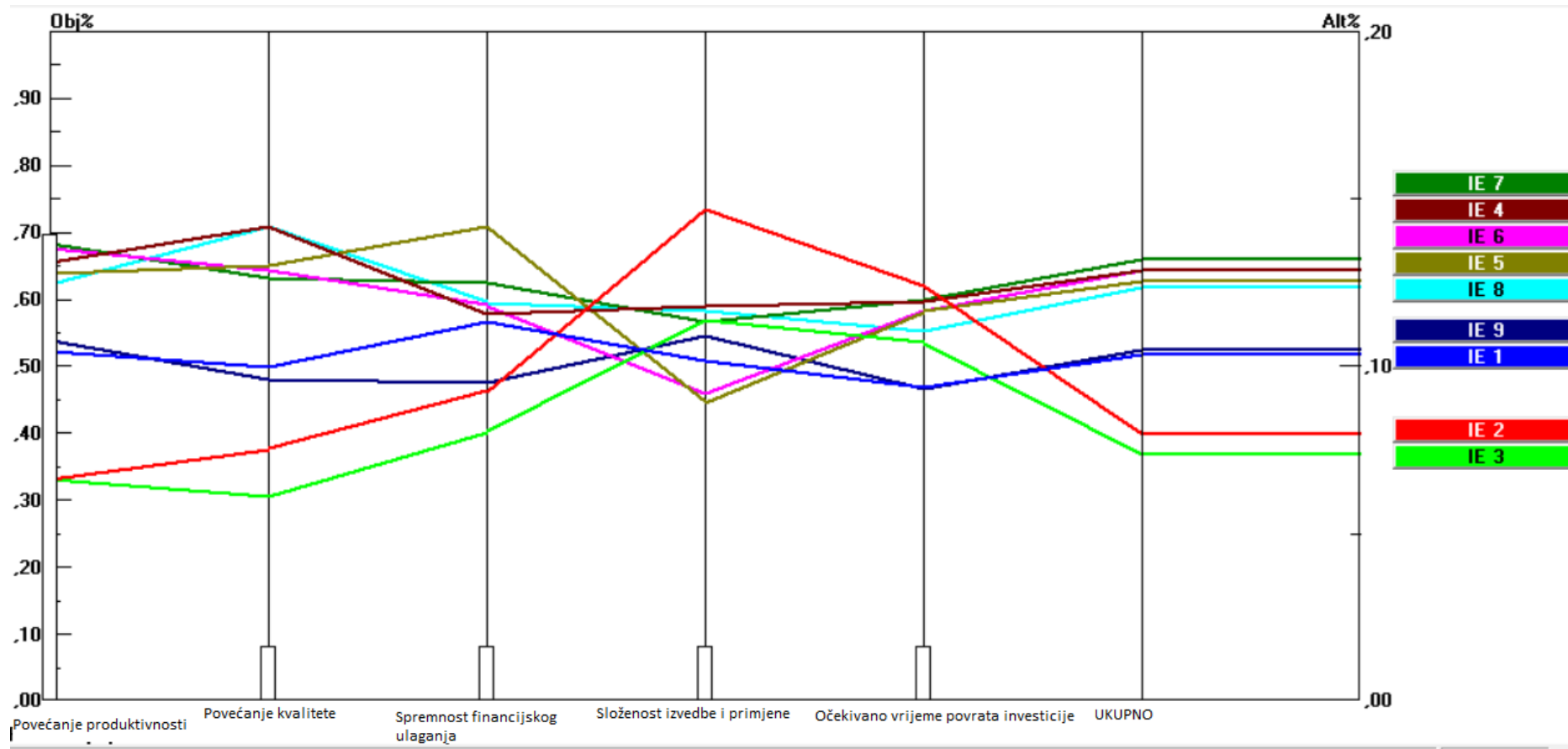
Slika 69 Opcija *gradient* s obzirom na kriterij „Složenost izvedbe i primjene“ kod grupe „Organizacija i ljudski resursi“



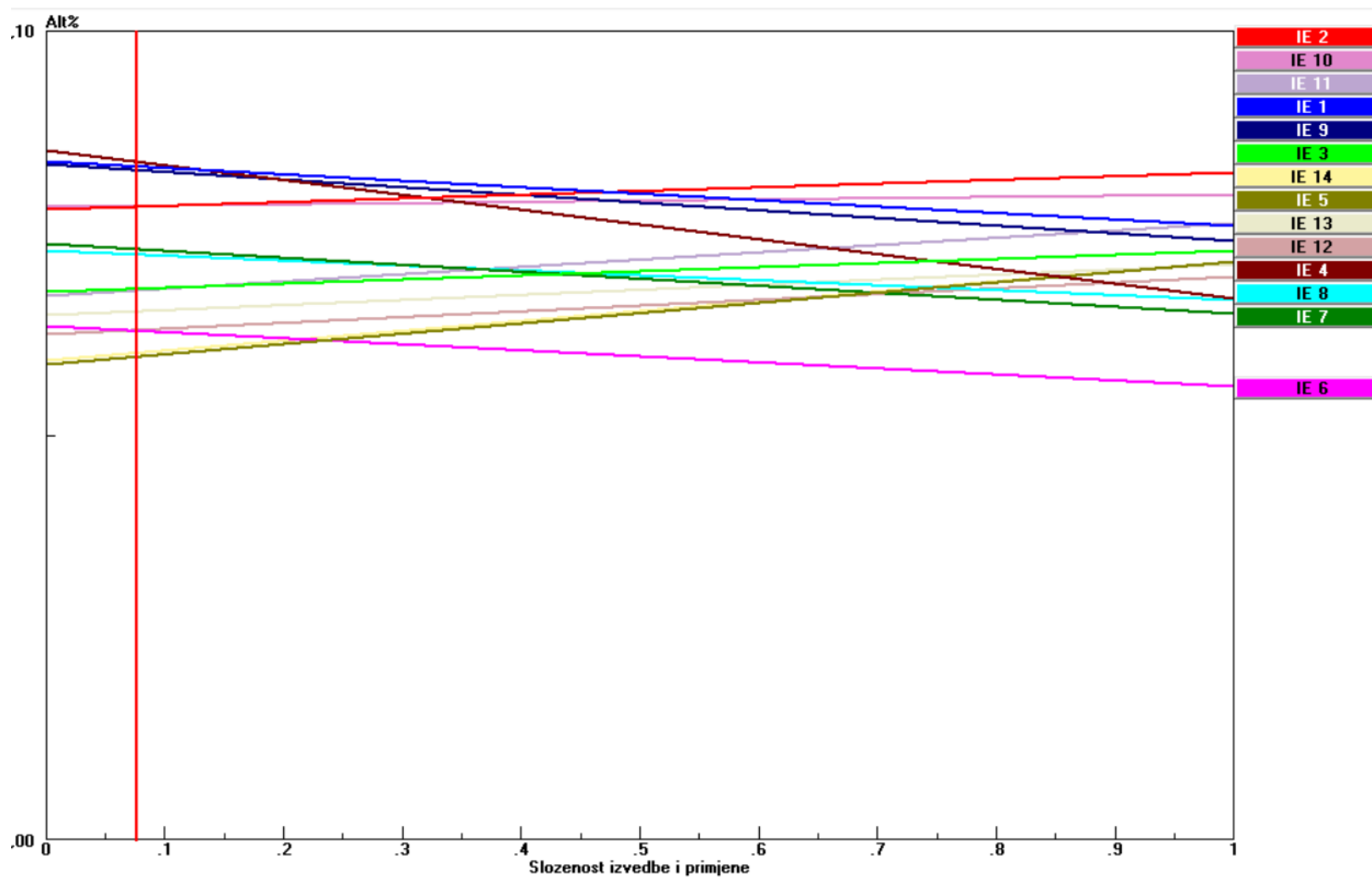
Slika 70 Opcija *gradient* s obzirom na kriterij „Povećanje produktivnosti“ kod grupe „Organizacija i ljudski resursi“

Slika 71 Opcija *dynamic* grupe „Organizacija i ljudski resursi“

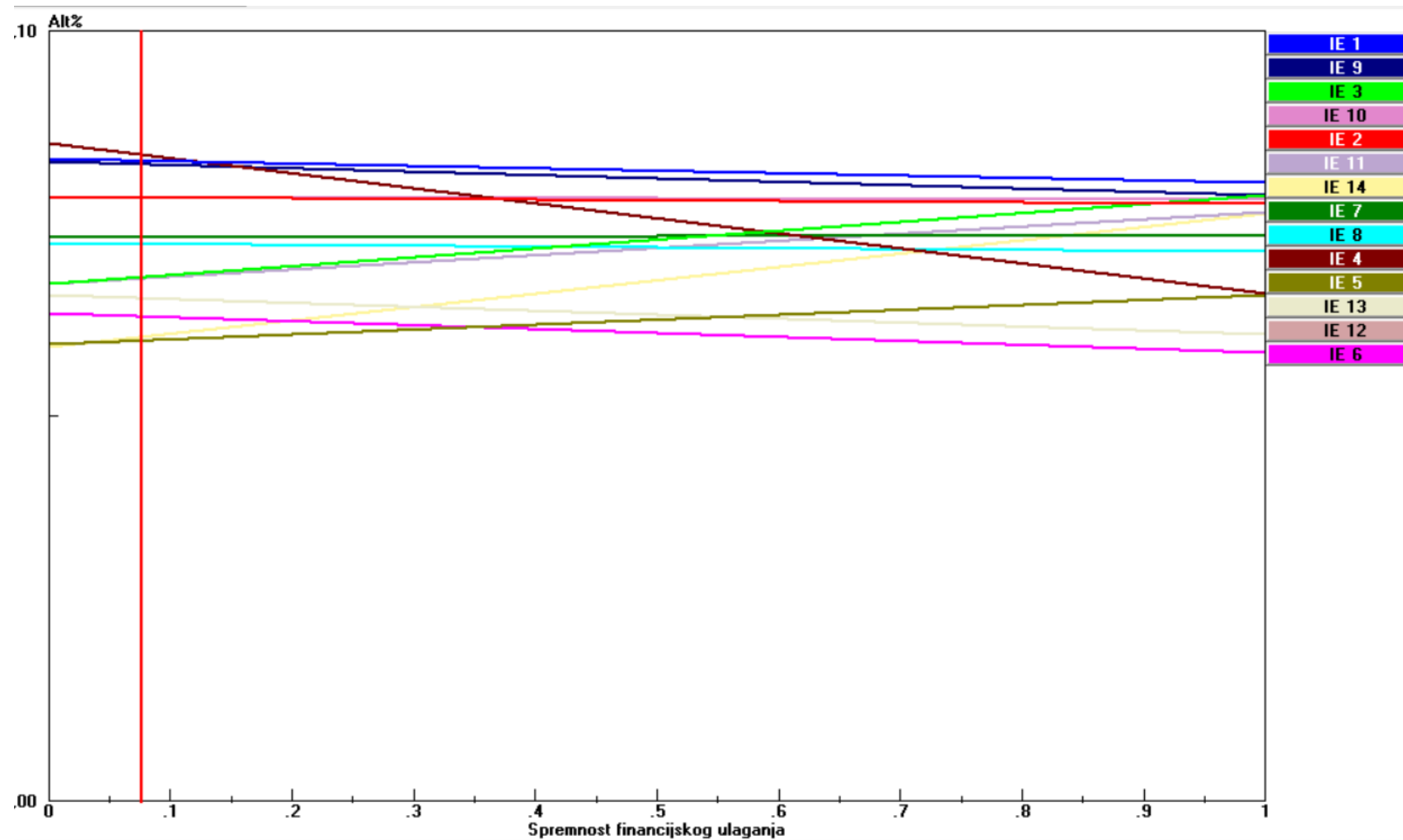
Slika 72 Opcija *dynamic* grupe „Organizacija i ljudski resursi“ – promjena za 5%



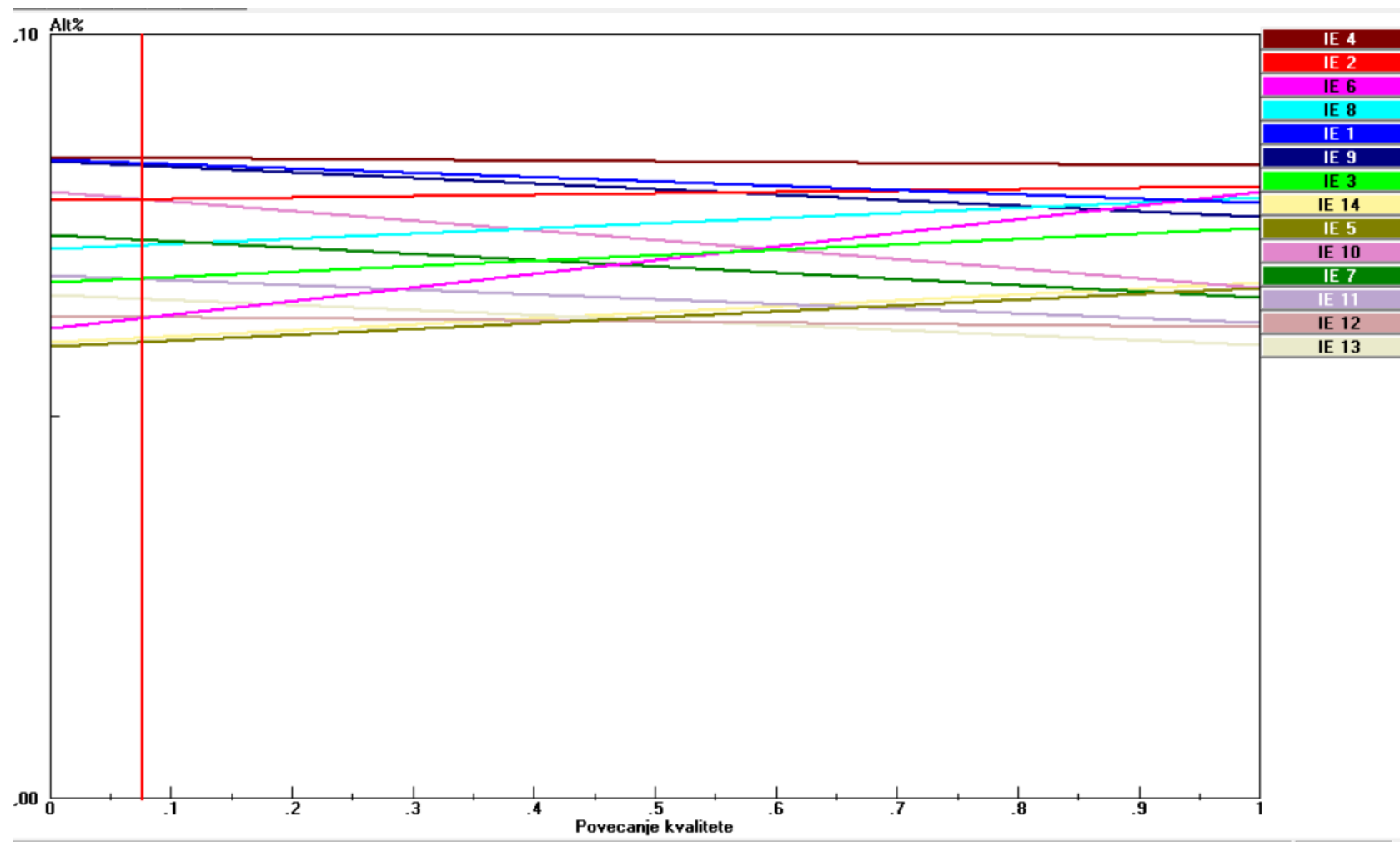
Slika 73 Opcija performance grupe „Organizacija i ljudski resursi“



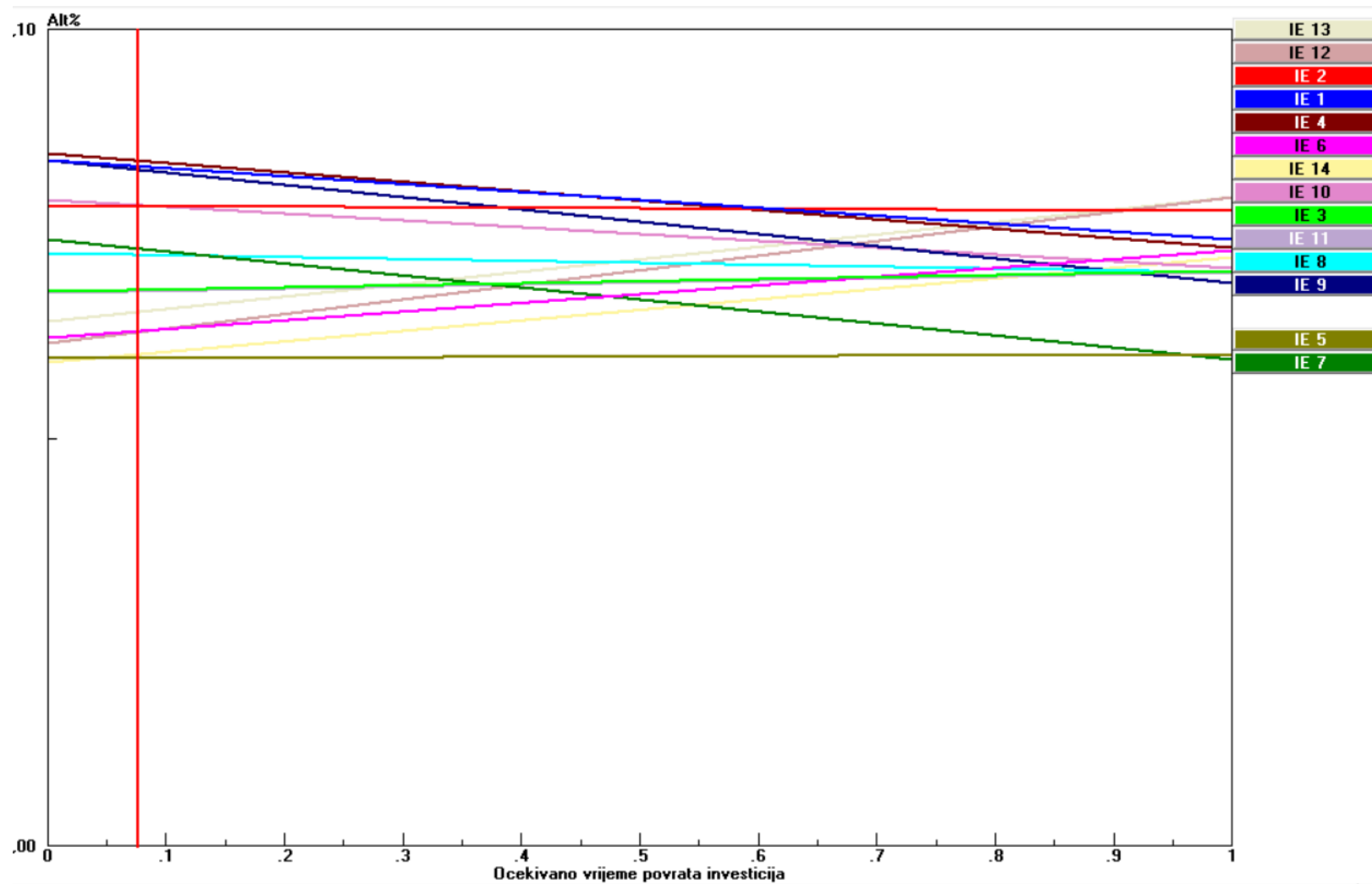
Slika 74 Opcija *gradient* s obzirom na kriterij „Složenost izvedbe i primjene“ kod grupe „Infrastruktura“



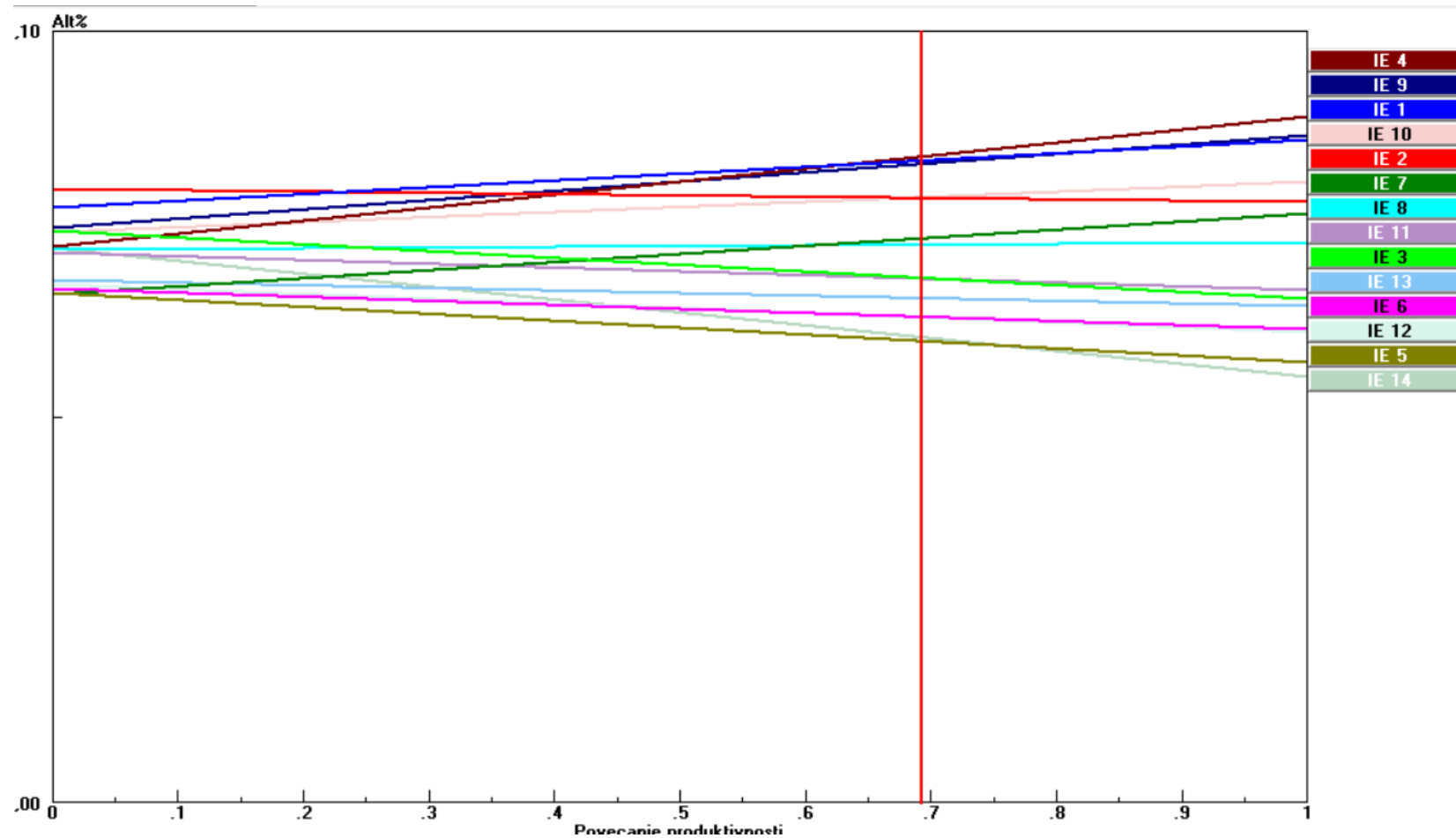
Slika 75 Opcija *gradient* s obzirom na kriterij „Spremnost finansijskog ulaganja“ kod grupe „Infrastruktura“



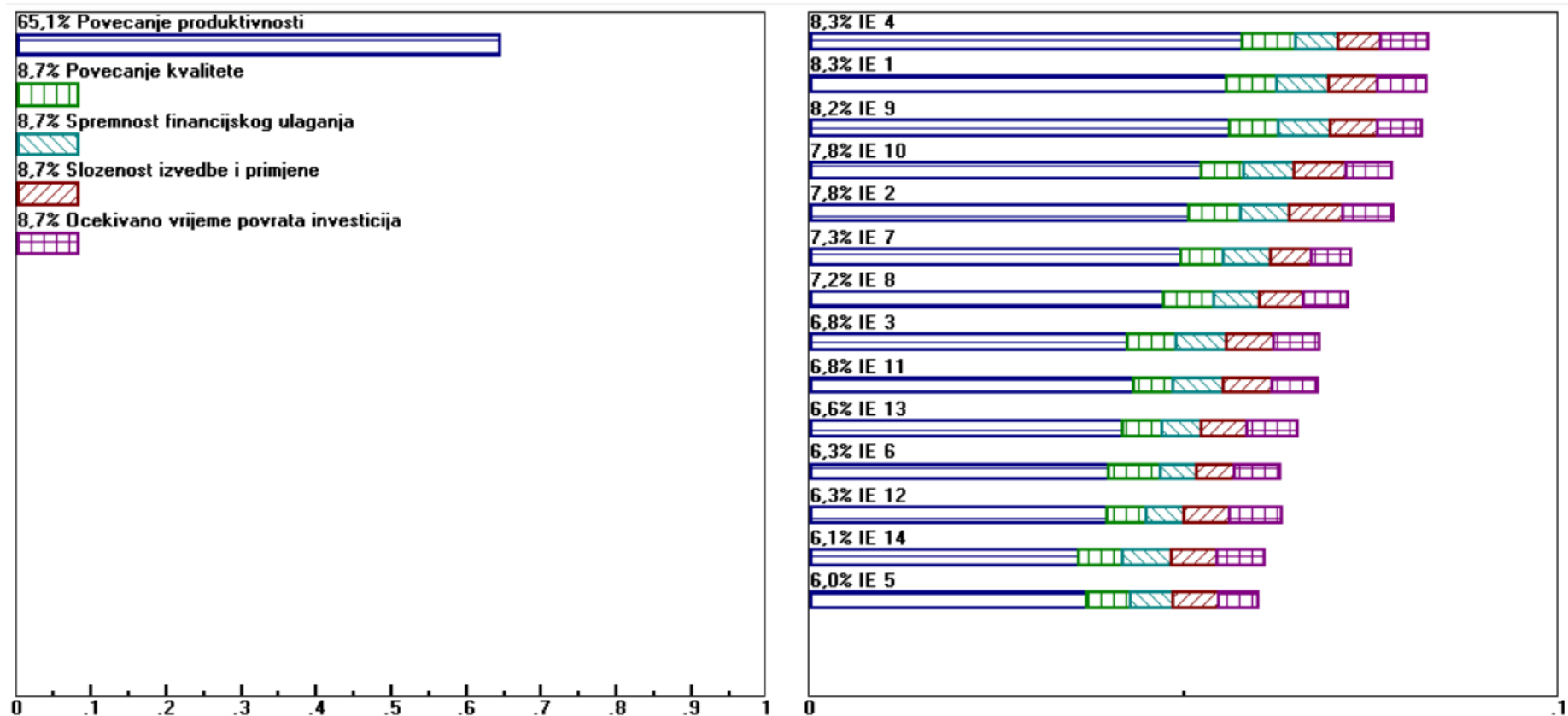
Slika 76 Opcija *gradient* s obzirom na kriterij „Povećanje kvalitete“ kod grupe „Infrastruktura“

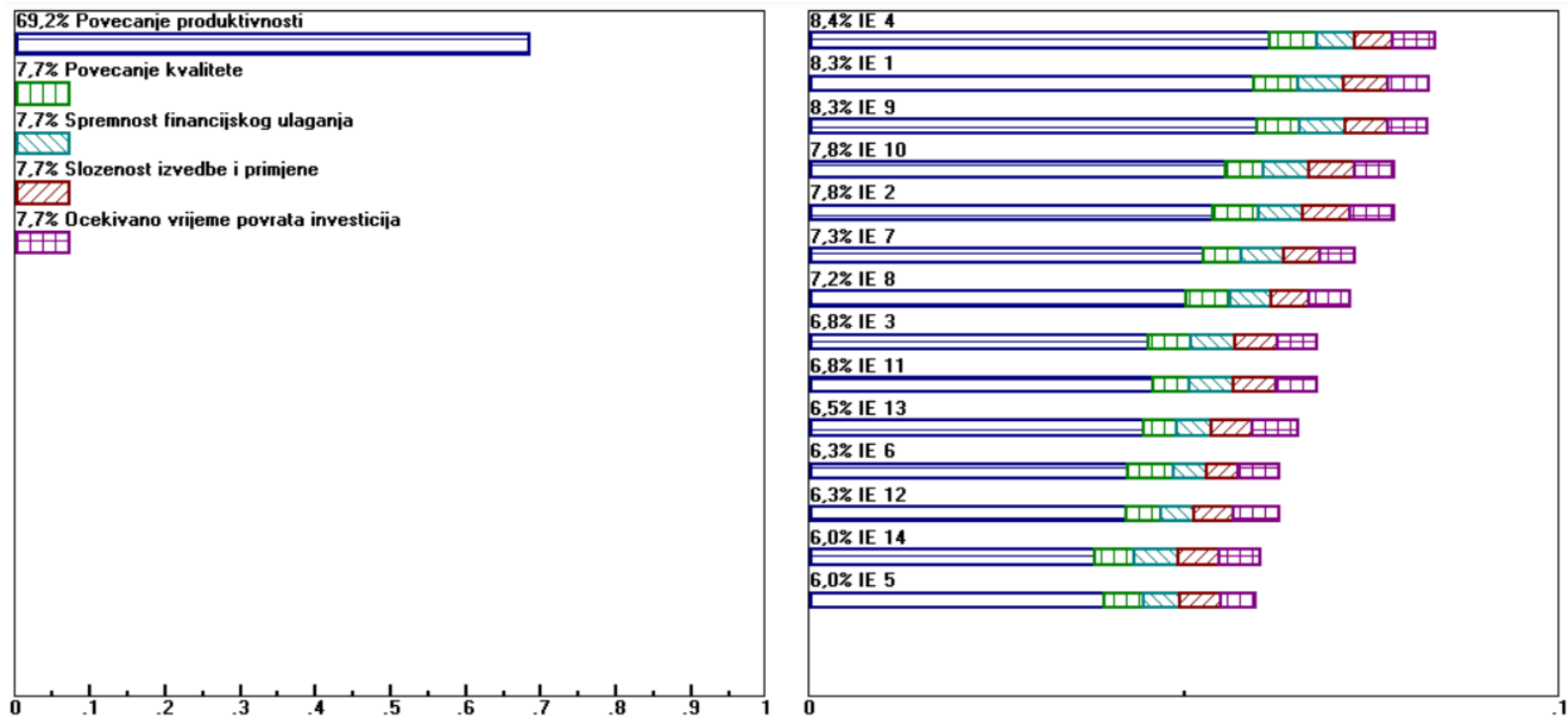


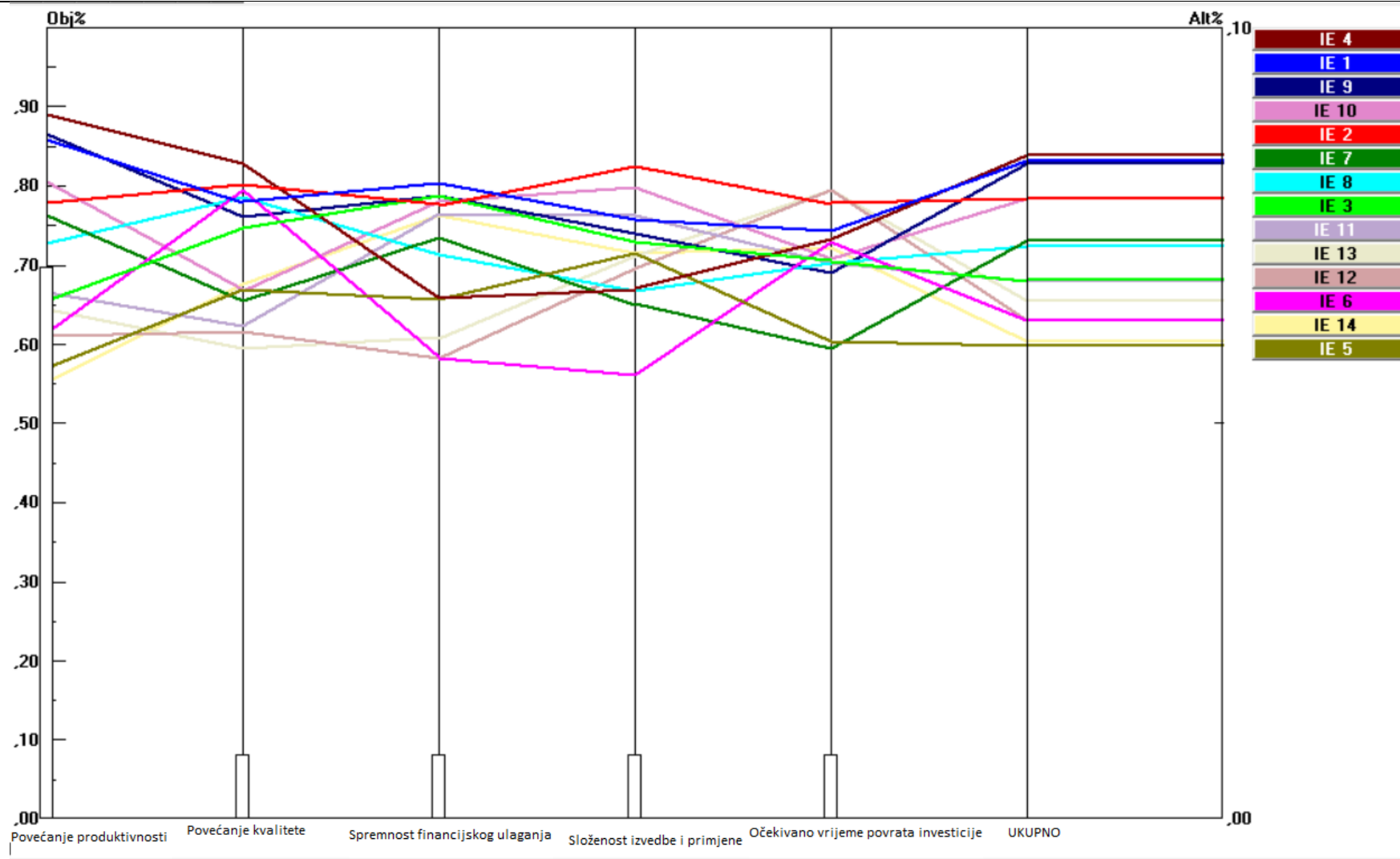
Slika 77 Opcija *gradient* s obzirom na kriterij „Očekivano vrijeme povrata investicija“ kod grupe „Infrastruktura“



Slika 78 Opcija *gradient* s obzirom na kriterij „Povećanje produktivnosti“ kod grupe „Infrastruktura“

Slika 79 Opcija *dynamic* grupe „Infrastruktura“

Slika 80 Opcija *dynamic* grupe „Infrastruktura“ – promjena za 5%



Slika 81 Opcija performance grupe „Infrastruktura“

Prilog 6 Anketa „Spremnost tehnološke pripreme za Industriju 4.0“

Spremnost tehnološke pripreme za Industriju 4.0

Poštovani,

kako bi se odredilo trenutno stanje u Vašem poduzeću te se odredila Vaša spremnost za uvođenje koncepta Industrije 4.0 (potpune digitalizacije), molim Vas da na sljedeća pitanja odgovorite na način da odaberete odgovor koji najbolje opisuje trenutno stanje u poduzeću.

*** Required**

Ime poduzeća *

Your answer

Vaša pozicija u poduzeću *

Your answer

Koristite li CAD programe? *

☐ Ne

☐ Ponekad

☐ Umjereno

☐ Često

☐ Uvijek

Koristite li CAM programe? *

- ☐ Ne
- ☐ Ponekad
- ☐ Umjereno
- ☐ Često
- ☐ Uvijek

Koristite li CAPP sustav? *

- ☐ Ne
- ☐ Ponekad
- ☐ Umjereno
- ☐ Često
- ☐ Uvijek

Kako odabirete tehnologije i redoslijed operacija? *

- ☐ Intuitivno i ručno (papir/olovka)
- ☐ Intuitivno i računalno (unošenje podataka u Word/Excel)
- ☐ Egzaktnim proračunom (ručno - papir/olovka)
- ☐ Egzaktnim proračunom pomoću računala
- ☐ Automatski pomoću posebnih računalnih simulacijskih programa

Kako odabirete alate, strojeve, stezne naprave i sl.? *

- ☐ Intuitivno i ručno (papir/olovka)
- ☐ Intuitivno i računalno (unošenje podataka u Word/Excel)
- ☐ Egzaktnim proračunom (ručno - papir/olovka)
- ☐ Egzaktnim proračunom pomoću računala
- ☐ Automatski pomoću posebnih računalnih simulacijskih programa

Kako definirate vrijeme i troškove izrade? *

- ☐ Intuitivno i ručno (papir/olovka)
- ☐ Intuitivno i računalno (unošenje podataka u Word/Excel)
- ☐ Egzaktnim proračunom (ručno - papir/olovka)
- ☐ Egzaktnim proračunom u računalu
- ☐ Automatski pomoću posebnih računalnih programa

Optimizirate li iskoristivost alata? *

- ☐ Ne
- ☐ Ponekad
- ☐ Umjereno
- ☐ Često
- ☐ Uvijek

Optimizirate li energetska učinkovitost strojeva? *

- ☐ Ne
- ☐ Ponekad
- ☐ Umjereno
- ☐ Često
- ☐ Uvijek

Kako definirate plan izrade? *

- ☐ Intuitivno i ručno (papir/olovka)
- ☐ Intuitivno i računalno (unošenje podataka u Word/Excel)
- ☐ Egzaktnim proračunom (ručno - papir/olovka)
- ☐ Egzaktnim proračunom uz pomoć računala
- ☐ Automatski pomoću posebnih računalnih programa

Jesu li procesi projektiranja standardizirani? *

- ☐ Ne
- ☐ Jako malo
- ☐ Polovica je standardizirana
- ☐ Većina je standardizirana
- ☐ Svi su procesi standardizirani

Koliki je utjecaj subjektivnosti planera? *

- ☐ Vrlo visok
- ☐ Djelomično visok
- ☐ Umjeren
- ☐ Prilično nizak
- ☐ Nezamjetan

Uvodite li kontinuirano nove tehnološke trendove i optimizirate sustav? *

- ☐ Ne
- ☐ Jako rijetko
- ☐ Umjereno
- ☐ Često
- ☐ Uvijek

Prikupljate li podatke u baze u stvarnom vremenu? *

- ☐ Ne
- ☐ Rijetko
- ☐ Umjereno
- ☐ Često
- ☐ Uvijek

Arhivirate li podatke iz svakog plana izrade u bazu? *

- ☐ Ne
- ☐ Samo neke
- ☐ Polovicu od ukupne količine podataka
- ☐ Većinu
- ☐ Sve

Koristite li stare podatke iz baze pri definiciji novog plana izrade? *

- ☐ Ne
- ☐ Rijetko
- ☐ Umjereno
- ☐ Često
- ☐ Uvijek

Koristite li metode prediktivne analitike? *

- ☐ Ne
- ☐ Rijetko
- ☐ Umjereno
- ☐ Često
- ☐ Uvijek

Jeste li povezani s vanjskim bazama podataka? *

- ☐ Ne
- ☐ Slabo
- ☐ Djelomično
- ☐ Poprilično
- ☐ U potpunosti

Koristite li princip Big Data Manipulation? *

- ☐ Ne
- ☐ Rijetko
- ☐ Umjereno
- ☐ Često
- ☐ Uvijek

Kako biste ocijenili funkcionalnost trenutne računalne infrastrukture? *

- ☐ Ne postoji
- ☐ Loša
- ☐ Zadovoljavajuća
- ☐ Vrlo dobra
- ☐ Odlična

Kako biste ocijenili fleksibilnost i modularnost trenutnog hardvera? *

- ☐ Ne postoji
- ☐ Loša
- ☐ Zadovoljavajuća
- ☐ Vrlo dobra
- ☐ Odlična

Kako biste ocijenili fleksibilnost i modularnost trenutnog softvera? *

- ☐ Ne postoji
- ☐ Loša
- ☐ Zadovoljavajuća
- ☐ Vrlo dobra
- ☐ Odlična

Kako biste ocijenili trenutnu internetsku infrastrukturu? *

- ☐ Ne postoji
- ☐ Loša
- ☐ Zadovoljavajuća
- ☐ Vrlo dobra
- ☐ Odlična

Koristite li Cloud Computing? *

- ☐ Ne
- ☐ Jako rijetko
- ☐ Umjereno
- ☐ Često
- ☐ Uvijek

Koristite li ERP sustave? *

- ☐ Ne
- ☐ Rijetko
- ☐ Umjereno
- ☐ Često
- ☐ Uvijek

Kako biste ocijenili trenutnu sigurnost podataka u Vašem poduzeću? *

- ☐ Ne postoji
- ☐ Loša
- ☐ Dobra
- ☐ Vrlo dobra
- ☐ Vrhunska

Koristite li princip prediktivnog održavanja hardvera i softvera? *

- ☐ Ne
- ☐ Rijetko
- ☐ Umjereno
- ☐ Često
- ☐ Uvijek

Kako biste ocijenili povezanost s ostalim sudionicima lanca vrijednosti? *

- ☐ Ne postoji
- ☐ Loša
- ☐ Dobra
- ☐ Vrlo dobra
- ☐ Vrhunska

Kako biste ocijenili interne komunikacijske kanale? *

- ☐ Ne postoje
- ☐ Loši
- ☐ Dobri
- ☐ Vrlo dobri
- ☐ Vrhunski

Koliko je Vaše poduzeće centralizirano? *

- ☐ U potpunosti je centralizirano
- ☐ Većinom je centralizirano
- ☐ Umjereno je centralizirano
- ☐ Djelomično je centralizirano
- ☐ Nije centralizirano

Kako biste ocijenili prosječnu motivaciju vašeg radnika? *

- ☐ Uopće nisu motivirani
- ☐ Ponekad su motivirani
- ☐ Umjereno su motivirani
- ☐ Zadovoljavajuće su motivirani
- ☐ Jako su motivirani

Koliko su Vaši radnici spremni na promjene? *

- ☐ Uopće nisu spremni na promjene
- ☐ Ponekad su spremni na promjene
- ☐ Djelomično su spremni na promjene
- ☐ Često su spremni na promjene
- ☐ Uvijek su spremni na promjene

Kako biste ocijenili inovativnost vaših radnika? *

- ☐ Uopće nisu inovativni
- ☐ Ponekad su inovativni
- ☐ Djelomično su inovativni
- ☐ Često su inovativni
- ☐ Uvijek su inovativni

Koristite li princip cjeloživotnog učenja? *

- ☐ Ne
- ☐ Rijetko
- ☐ Umjereno
- ☐ Često
- ☐ Uvijek

Koristite li elemente lean ili kaizen principa? *

- ☐ Ne
- ☐ Rijetko
- ☐ Umjereno
- ☐ Često
- ☐ Uvijek

Koliko je Vaše poduzeće horizontalno i vertikalno integrirano? *

- ☐ Nije uopće
- ☐ Slabo
- ☐ Djelomično
- ☐ Poprilično
- ☐ U potpunosti

Kada biste uvodili Industriju 4.0, odnosno kompletno digitalizirali odjel tehnološke pripreme, molimo da usporedite ciljeve, u smislu koji bi Vam cilj bio važniji, gdje 3 označava jednaku važnost *

	1	2	3	4	5	
Povećanje produktivnosti	☐	☐	☐	☐	☐	Povećanje kvalitete

*

	1	2	3	4	5	
Povećanje produktivnosti	☐	☐	☐	☐	☐	Spremnost financijskog ulaganja

*

	1	2	3	4	5	
Povećanje produktivnosti	☐	☐	☐	☐	☐	Složenost izvedbe i primjene

*	1	2	3	4	5	
Povećanje produktivnosti	☐	☐	☐	☐	☐	Očekivano vrijeme povrata investicije

*	1	2	3	4	5	
Povećanje kvalitete	☐	☐	☐	☐	☐	Spremnost financijskog ulaganja

*	1	2	3	4	5	
Povećanje kvalitete	☐	☐	☐	☐	☐	Složenost izvedbe i primjene

*	1	2	3	4	5	
Povećanje kvalitete	☐	☐	☐	☐	☐	Očekivano vrijeme povrata investicije

★

1 2 3 4 5

Spremnost financijskog ulaganja ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Složenost izvedbe i primjene

★

1 2 3 4 5

Spremnost financijskog ulaganja ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Očekivano vrijeme povrata investicije

★

1 2 3 4 5

Složenost izvedbe i primjene ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Očekivano vrijeme povrata investicije

Životopis autorice:

Maja Trstenjak rođena je 21. studenog 1992. godine u Koprivnici. Osnovnu školu i Opću gimnaziju završila je u Koprivnici s odličnim uspjehom. 2011. godine upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, smjer Industrijsko inženjerstvo i menadžment.

2015. godine završava preddiplomski studij s odličnim uspjehom i najvišom pohvalom (*summa cum laudae*), za što joj je dodijeljena Medalja Fakulteta za izvanredan uspjeh na studiju. Na Fakultetu djeluje kao demonstrator na Katedri za projektiranje proizvodnje i Katedri za elektrotehniku. Iste godine upisuje diplomski studij Fakulteta strojarstva i brodogradnje, smjer Industrijsko inženjerstvo i menadžment. Studij završava 2016. godine s najvišom pohvalom (*summa cum laudae*) čime stječe titulu magistra inženjerka strojarstva. Za uspjeh na diplomskom studiju dodijeljena joj je Medalja Fakulteta za izvanredan uspjeh na studiju.

Iste godine zapošljava se na Fakultetu kao asistent na Zavodu za industrijsko inženjerstvo te upisuje Doktorski studij, smjer Industrijsko inženjerstvo i menadžment. Objavila je više od 20 znanstvenih članaka u prestižnim međunarodnim časopisima i zbornicima uglednih međunarodnih konferencija. 2016. i 2017. godine djelovala je kao dio organizacijskog odbora međunarodne znanstvene konferencije MOTSP (*Management of Technology Step to Sustainable Production*). Od 2018. do 2020. vršila je dužnost voditeljice Laboratorija za projektiranje tehnoloških procesa pri Katedri za projektiranje proizvodnje Fakulteta. Od 2016. članica je Povjerenstva za odnose s javnošću Fakulteta, a od 2020. članica je Fakultetskog vijeća. 2020. dobiva stipendiju za prestižnu zimsku doktorsku školu u organizaciji Europskog instituta za inovacije i tehnologiju (EIT) gdje je primila nagradu kao jedna od najboljih polaznica.

Od 2007. se bavi i glazbenim novinarstvom, a danas je glavna urednica najpopularnijeg glazbenog web portala u Hrvatskoj i regiji, „Sound Report“. Djeluje i kao suradnica Koncertne dvorane Vatroslava Lisinskog, časopisa „Cantus“ Hrvatskog društva skladatelja te predavač u „Rock&Off školi novinarstva“ u organizaciji Unisona hrvatskog glazbenog saveza.

Aktivna je govornica engleskog i njemačkog jezika.

Popis objavljenih radova:

1. Trstenjak, M., Opetuk, T., Cajner, H., Tosanovic, N.: Process Planning in Industry 4.0—Current State, Potential and Management of Transformation. *Sustainability*, 12 (2020), 15; 5878, 25 doi:10.3390/su12155878
2. Trstenjak, M., Opetuk, T.: Industry 4.0 Readiness Factor Calculation and Process Planning: State-of-the-Art Review. *Transactions of FAMENA*, Vol. 44 No. 3, 2020. <https://doi.org/10.21278/TOF.44301>
3. Trstenjak, M., Opetuk, T., Pavković, D., Zorc, D.: Sustainability and Industry 4.0 - overview of driving forces and barriers. *Digital proceedings of 4th South East Europe (SEE) Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems (SDEWES) conference / Ban, Marko (ur.). Sarajevo, Bosna i Hercegovina, 2020.*
4. Poór, P., Trstenjak, M., Basl, J.: Maintenance Ideal Model in Industry 4.0 – A Transformation Strategy Roadmap to Readiness Factor Calculation. *HRADEC ECONOMIC DAYS 2020, VOL 10, PT 1 Hradec Kralove, Česka: University of Hradec Kralove, 2020. str. 642-648 doi:10.36689/uhk/hed/2020-01-073*
5. Trstenjak, M., Opetuk, T., Pavković, D., Zorc, D.: Industry 4.0 in Croatia – Perspective and Industrial Familiarity with the (New) Digital Concept. *Proceedings of 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing / Wang, Lihui ; Majstorovic, Vidosav D. ; Mourtzis, Dimitris ; Carpanzano, Emanuele ; Moroni, Giovanni ; Galantucci, Luigi M. (ur.). Cham, Switzerland: Springer, 2020. str. 345-355 doi:10.1007/978-3-030-46212-3_26*
6. Đurđević, D., Trstenjak, M., Hulenčić, I.: Sewage Sludge Thermal Treatment Technology Selection by Utilizing the Analytical Hierarchy Process. *Water*, 15 (2020), 5; 1255, 17 doi:10.3390/w12051255
7. Trstenjak, M., Cajner, H., Opetuk, T.: Industry 4.0 Readiness Factor Calculation: Criteria Evaluation Framework. *FME Transactions*, 47 (2019), 4; 841-845 doi:10.5937
8. Trstenjak, M., Lisjak, D., Opetuk, T., Pavković, D.: Application of multi criteria decision making methods for readiness factor calculation. *Proceedings of 18th IEEE International Conference on Smart Technologies EUROCON 2019 / Dumnić, Boris (ur.). Novi Sad, Srbija: University, Faculty of Technical Sciences, 2019. 05428, 6*

9. Trstenjak, M., Čosić, P., Antolić, D.: Workpiece Classification Criteria in Automated Process Planning. // Tehnički vjesnik : znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku, 26 (2019), 1; 256-262 doi:10.17559/TV-20180215105405
10. Trstenjak, M., Čosić, P.: Challenges of Human Resources Management with implementation of Industry 4.0. IoTsm2018 London, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2018. 87, 201.
11. Lusic, T., Trstenjak, M., Cosic, P.: Ergonomic Design of a Workplace. MOTSP2018 Conference Proceedings / Cosic, Predrag; Trstenjak, Maja; Baric, Gordana (ur.). Zagreb: FSB, 2018.
12. Dubreta, Niksa; Trstenjak, Maja; Turk, Tomislav: Communications and subcultures as elements of interdepartmental relations in an intra- organizational setting. // MOTSP2018 Conference Proceedings, Cosic, Predrag; Trstenjak, Maja; Baric, Gordana (ur.). Zagreb: FSB, 2018.
13. Trstenjak, M., Cosic, P.: Lean Philosophy in the Digitalization Process. MOTSP2018 Conference Proceedings / Cosic, Predrag ; Trstenjak, Maja ; Baric, Gordana (ur.). Zagreb: FSB, 2018. 34, 6.
14. Trstenjak, M., Cosic, P.: Industry 4.0 readiness factor criteria for the supply chain. Proceedings of XXII International conference on material handling, constructions and logistics, MHCL 2017 Beograd, 2017.
15. Kušmišević, M., Trstenjak, M., Cosic, P.: Product lifecycle management through production of electromotor. MOTSP2017 Dubrovnik, Hrvatska, 2017.
16. Antonio M., Maja T., Cosic, P.: Implementation PLM concept in simulation of production of an axial fan. MOTSP2017 Dubrovnik, Hrvatska, 2017. str. 30-35
17. Trstenjak, M., Cosic, P.: Industry 4.0 readiness factor calculation - problem structuring. International Conference Management of Technology – Step to Sustainable Production (MOTSP 2017) Dubrovnik, Hrvatska, 2017.
18. Trstenjak, M., Čosić, P.: Process Planning in Industry 4.0 Environment. Procedia Manufacturing 11 / S.J. Hu (ur.). Modena, Italija: Elsevier, 2017. str. 1744-1750
19. Trstenjak, M., Čosić, P.: Operation Sequencing Using Analytic Hierarchy Process. MOTSP2016 Poreč, Hrvatska, 2016.
20. Trstenjak, M., Čosić, P.: Sequencing Of Single Product Operations With Multiple Technological Criteria. International Conference On Industrial Logistics, ICIL 2016 Zakopane, Poljska, 2016.

-
21. Trstenjak, M., Čosić, P.: NEW MACHINES SELECTION TOOLS USING ANALYTIC HIERARCHY PROCESS. Proceedings of 7th International Scientific Conference Management of Technology - Step to Sustainable Production, MOTSP2015, 10-12 June 2015, Brela, Makarska, Croatia / Editor-in-Chief Predrag Čosić (ur.). Zagreb: Croatian Association for PLM (CAPLM), 2015.
 22. Trstenjak, M., Čosić, P.: Decision support for machine tools selection in process planning and equipment investment. Proceedings of the 25th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing ChikeF. Oduoza, CEng, FICHEM (ur.). Wolverhampton, UK: University of Wolverhampton, UK, 2015. str. 266-273.
 23. Pavković, D., Krznar, M., Cipek, M., Zorc, D., Trstenjak, M.: Internal Combustion Engine Control System Design Suitable for Hybrid Propulsion Applications. Proceedings of the ICUAS 2020 conference, Atena, Grčka, 2020. str. 1614-1619