

Metodologija za odabir optimalnog postupka implementacije koncepta Brodogradnja 4.0

Stanić, Venesa

Doctoral thesis / Disertacija

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:190:791667>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-31**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Venesa Stanić

**METODOLOGIJA ZA ODABIR OPTIMALNOG
POSTUPKA IMPLEMENTACIJE KONCEPTA
*BRODOGRADNJA 4.0***

DOKTORSKI RAD

Rijeka, 2023.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Venesa Stanić

**METODOLOGIJA ZA ODABIR OPTIMALNOG
POSTUPKA IMPLEMENTACIJE KONCEPTA
*BRODOGRADNJA 4.0***

DOKTORSKI RAD

Mentori: prof. dr.sc. Marko Hadjina
prof. dr.sc. Tin Matulja

Rijeka, 2023.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF ENGINEERING

Venesa Stanić

**METHODOLOGY FOR SELECTING THE OPTIMAL
PROCEDURE FOR THE IMPLEMENTATION OF THE
SHIPBUILDING 4.0 CONCEPT**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2023.

Mentori rada:

prof. dr.sc. Marko Hadjina, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci

prof. dr.sc. Tin Matulja, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci

Doktorski rad obranjen je dana 05.09.2023 na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

1. prof. dr. sc. Albert Zamarin, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci
2. izv.prof. dr. sc. Sandro Doboviček, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci
3. izv. prof. dr. sc. Boris Ljubenkov, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Splitu

ZAHVALE

Trud koji sam uložila tijekom radnog vijeka i vlastitih istraživanja ne bi rezultirali ovim doktorskim radom, da nije bilo onih koji su mi pomagali, hrabрили i tjerali naprijed.

Prvenstveno se zahvaljujem Mentorima prof. dr.sc. Marku Hadjini i prof. dr.sc. Tinu Matulji, te umirovljenom prof. dr.sc. Nikši Fafandjelu s Katedre za tehnologiju i organizaciju brodogradnje Tehničkog fakulteta u Rijeci koji su me poticali i motivirali da ovaj rad ugleda svjetlo dana.

Od srca im se zahvaljujem na savjetima, angažmanu, pomoći, motivirajućim riječima te izuzetnoj suradnji tijekom cijelog perioda istraživanja i rada na doktorskom radu.

Sve moje iskustvo i znanje koje sam stekla kroz svoj dosadašnji radni vijek mogu zahvaliti u najvećoj mjeri svom dugogodišnjem angažmanu u Brodosplitu, Split i Damen Schelde Naval Shipbuilding, Nizozemska te svojim brojnim suradnicima i kolegama.

Bez ljubavi, snage i poticaja moje obitelji ne bi bila dovoljno snažna obaviti ovaj težak, složen i dugotrajan posao, zato se od sveg srca zahvaljujem suprugu Oliveru a ovaj rad posvećujem djeci Filipu i Dori.

Autorica

SAŽETAK

Brodogradnja 4.0 (eng. *Shipbuilding 4.0*) potaknuta digitalizacijom, optimizacijom i povezivanjem procesa pruža brodograđevnom sektoru mogućnost odgovora na promjenjive zahtjeve brodograđevnog tržišta, koji se iskazuju u vidu zahtjeva za što kraćim periodom gradnje broda ali i sve izraženijeg personaliziranog pristupa kupcima brodova s individualiziranim tehničkim rješenjima koji ispunjavaju sve ekološke i ergonomske zahtjeve u eksploataciji broda.

U radu je predložena metodologija za odabir optimalnog postupka implementacije koncepta *Brodogradnja 4.0*.

U prvom dijelu rada, prema dostupnim izvorima, istražene su metode, tehnike i alati koji se općenito razmatraju za primjenu nekog od odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*.

Nadalje na temelju istraženog, izvršen je odabir metoda, tehnika i alata koje je moguće prilagoditi potrebama ovdje predložene metodologije, a temelje se na provođenju predloženog postupka koja se sastoji iz nekoliko faza.

U prvoj fazi definirana su anketna pitanja kako bi se utvrdilo postojeće stanje saznanja o odabranim elementima koncepta *Brodogradnja 4.0*, te se anketnim postupkom i obradom prikupljenih podataka izvršila analiza stanja i utvrdila tehnološka razina brodograđevne industrije prikupljena od predstavnika brodogradilišta, proizvođača brodske opreme, kooperanata, znanstvenih ustanova i razvojnih instituta s ciljem utvrđivanja postojećeg stajališta i koraka koje je potrebno poduzeti kako bi se koncept *Brodogradnja 4.0* uspješno implementirao.

U drugoj fazi utvrđeni su odabrani elementi koncepta *Brodogradnja 4.0* na temelju provedenog anketiranja relevantnih stručnjaka.

U trećoj fazi generiranjem svih mogućih varijanti redoslijeda implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, na temelju utvrđenih kriterija (ograničenja) i odabranih elemenata koncepta, upotrebom posebno prilagođenog alata korištenjem analitičkog hijerarhijskog procesa, formira se redoslijed implementacije odabranih elemenata koncepta koji optimalno udovoljavaju postavljenim kriterijima. Analizom osjetljivosti potvrđuje se stabilnost odabranog rješenja.

U četvrtoj fazi metodom simulacijskog modeliranja izvršena je analiza implementacije i potvrda rezultata istraživanja čime su cilj i hipoteza istraživanja potvrđeni.

Ključne riječi : *Brodogradnja 4.0*, AHP metoda, simulacijsko modeliranje

SUMMARY

Shipbuilding 4.0, driven by digitalization, optimization and connection of processes, provides the shipbuilding sector with the opportunity to respond to challenging demands of the shipbuilding market, which are expressed in the form of requirements for shorter shipbuilding and more personalized approach to vessel Buyers with individualized technical solutions, which meet all environmental and ergonomic requirements in the operation of the vessel.

The paper proposes a methodology for selecting the optimal procedure for the implementing of the *Shipbuilding 4.0* concept.

In the first part, according to available sources, the methods, techniques and tools are generally considered for the application of the digital technologies of the *Shipbuilding 4.0* concept are researched.

Furthermore, based on the research, a selection of methods, techniques and tools that can be adapted to the needs of the proposed methodology, based on the implementation of the proposed procedure, which consists of several phases.

In the first phase, survey questions were specified in order to determine the current researches about the *Shipbuilding 4.0* concept in order to specify the existing position and the steps that need to be taken in order to successfully implement the *Shipbuilding 4.0* concept.

In the second phase, the digital technologies of the *Shipbuilding 4.0* concept were selected based on a survey of relevant experts.

In the third phase, by generating and evaluating all possible scenarios of the application of the *Shipbuilding 4.0* concept and digital technologies on the basis of established relations of closeness, the order of implementation that optimally meets the set criteria is selected through an analytical hierarchical procedure. Sensitivity analysis examines the stability of the chosen solution in order to confirm the optimal implementation procedure of the *Shipbuilding 4.0* concept.

In the fourth phase, the results were modelled using the simulation modelling tool, which confirmed the aim and the hypothesis of the research.

Keywords: *Shipbuilding 4.0*, AHP method, Simulation modelling

KLJUČNE RIJEČI

Brodogradnja 4.0

Analitički hijerahijski proces (AHP metoda)

Simulacijsko modeliranje

KEY WORDS

Shipbuilding 4.0

Analytic Hierarchy Process

Simulation Modelling

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Problem i predmet istraživanja	1
1.2. Pregled dosadašnjih istraživanja	3
1.3. Cilj istraživanja i hipoteza istraživanja	4
1.4. Metodologija istraživanja	5
1.5. Očekivani znanstveni doprinos	6
1.6. Primjena rezultata istraživanja	7
1.7. Struktura doktorskog rada	8
2. PREGLED STANJA ZNANJA I POSTOJEĆIH ISTRAŽIVANJA	9
2.1. Od <i>Industrije 2.0</i> do <i>Industrije 4.0</i>	9
2.2. <i>Industrija 4.0</i>	10
2.3. Razvoj koncepta <i>Industrije 4.0</i>	11
2.4. Industrijska revolucija u brodograđevnoj industriji	12
2.5. Analiza postojećih istraživanja prema <i>Brodogradnji 4.0</i>	13
2.6. Tehnologije <i>Brodogradnje 4.0 (elementi koncepta)</i>	16
2.7. Sažetak	25
3. VREDNOVANJE RAZINE INDUSTRIJSKE ZRELOSTI PREMA BRODOGRADNJI 4.0	27
3.1. Istraživanje industrijske zrelosti prema <i>Brodogradnji 4.0</i>	27
3.2. Područje istraživanja i faze istraživanja	27
3.3. Uvod u analizu postojećeg stanja brodograđevne industrije	28
3.4. Anketa	29
3.4.1 Prva grupa pitanja	31
3.4.2 Druga grupa pitanja	31
3.4.3 Treća grupa pitanja	31
3.5. Obrada podataka – opći podaci o ispitanicima	31
3.6. Druga grupa pitanja rezultati – procjena sadašnjeg stanja	35
3.7. Analiza tehnike, zaposlenika i organizacije	41
3.7.1 Analiza tehnike	42
3.7.2 Analiza zaposlenika	43
3.7.3 Analiza organizacije	43
3.7.4 Analiza rezultata primjene naprednih tehnologija	44
3.7.5 Analiza raspoloživih resursa	44
3.8. Sažetak rezultata prvog dijela ankete	45
3.9. Smjernice prema <i>Brodogradnji 4.0</i>	46
3.10. Analiza odabira elemenata koncepta	48
3.11. Analiza prioriteta odabranih elemenata koncepta	51
3.12. Analiza procjene investicijskih troškova za implementaciju	51
3.13. Analiza vremenskog perioda za implementaciju	53
3.14. Analiza odabira glavnih kriterija za implementaciju	54
3.15. Smjernice za početak procesa implementacije koncepta	55

4. PRIJEDLOG METODOLOGIJE ZA POSTUPAK IMPLEMENTACIJE	
ODABRANIH ELEMENATA KONCEPTA <i>BRODOGRADNJA 4.0</i>	57
4.1. Uvod	57
4.2. Faza 1- Identificiranje odabranih elemenata koncepta	60
4.2.1 Odabir elemenata koncepta <i>Brodogradnja 4.0</i>	60
4.2.2 Uspostava postavljenih kriterija (ograničenja)	62
4.3. Faza 2 – Analiza usporedbe kriterija korištenjem <i>AHP</i> alata	62
4.3.1 Analitički hijerarhijski proces (<i>AHP</i>)	62
4.4. Uspostava kriterija i elemenata koncepta korištenjem <i>AHP</i> alata	64
4.5. Utvrđivanje odnosa bliskosti i pripadajućih težinskih faktora	67
4.6. Odabir optimalnog postupka implementacije koncepta	79
4.7. FAZA 3 – Utvrđivanje stabilnosti odabranog rješenja	81
4.7.1 Dinamička analiza osjetljivosti	82
4.7.2 Analiza izvedbene osjetljivosti	83
4.7.3 Analiza dijagramom stupnja osjetljivosti	85
4.7.4 Analiza dijagramom sučeljavanja	86
4.8. Prikaz postupka za osnivanje metodologije implementacije	87
5. PROVJERA PREDLOŽENE METODOLOGIJE NA PRIMJERU	
BRODOGRADILIŠTA PRIMJENOM SIMULACIJSKOG MODELIRANJA	89
5.1. Uvod	89
5.2 FAZA 1 - Zahtjevi za unaprjeđenje proizvodnog procesa	92
5.3. Definiranje problema i prikaz postojećeg stanja	93
5.4. Definiranje ciljeva projekta primjene simulacijskog modeliranja	94
5.5. FAZA 2 – Definiranje ulaznih podataka i osmišljavanje modela	95
5.5.1 Prikaz tehnološkog procesa proizvodne radionice	95
5.5.2 Osnovne značajke tehnološkog procesa u radionici	97
5.5.3 Tehničke karakteristike linije za simulacijski model	98
5.6 FAZA - 3 Osnivanje simulacijskog modela	100
5.7 Ulazni asortiman skupine materijala za simulacijski model	102
5.8 Izrada modela	103
5.8.1 Proizvodno vrijeme aktivnosti u simulacijskom modelu	106
5.9 Verifikacija simulacijskog modela	106
5.10 Opis i analiza simulacijskog modela	107
5.11. FAZA 4 - Analiza radnih stanica i unaprjeđenje procesa	113
5.12. Unaprjeđenje značajki procesa u radionici	114
5.13 Osnovne tehničke značajke RFID tehnologije	115
5.13.1 Tehnologija prikupljanja podataka korištenjem RFID	117
5.14 Primjena i analiza unaprjeđenja značajki procesa u radionici	120
5.15 Analiza toka materijala primjenom RFID tehnologije	120
5.16 FAZA 5 - Zaključak provedene analize i dokumentiranje rezultata	130
6. ZAKLJUČAK	132
LITERATURA	136
POPIS KRATICA	143
POPIS SLIKA	144
POPIS TABLICA	146

POPIS PRIVITAKA	147
PRIVITCI	148
ŽIVOTOPIS	196

1. UVOD

1.1 Problem i predmet istraživanja

Brodograđevna industrija jedna je od najvažnijih aktivnosti u ljudskom razvoju [1]. Mnogo toga u međunarodnoj brodogradnji mijenja se u skladu s promjenama koje su donosile industrijske revolucije. Brodograđevna industrija nalazi se pred izazovom promjenjivih zahtjeva globalnog poslovnog tržišta, zahtjeva se skraćenje perioda gradnje broda, personalizirani pristup prema kupcima, individualizirana tehnička rješenja, zadovoljenje ekoloških standarda i ekološka održivost procesa gradnje broda.

Stoga, kako bi ponuđeni projekti u brodograđevnoj industriji biti profitabilni, potreban je rad na podizanju kvalitete, skraćanju vremena gradnje kao najvažnijih aspekata u procjeni vrijednosti pojedinog broda.

Brodograđevni proizvodni procesi trebaju zadovoljiti ekološke standarde proizvodnje, ostvariti prilagodljivost proizvodnog procesa uz skraćenje trajanja proizvodnje sa što manje pokušaja i pogrešaka.

Neka brodogradilišta nisu uspjela pratiti promjene koje su donosile revolucije, no neka su opstala i promjenama ostvarila profit. Tijekom perioda projektiranja i gradnje pojavljivali su se novi zahtjevi kupca koji je uočavao određene potencijalne probleme za eksploataciju ili su stupali na snagu novi propisi koji su zahtijevali izmjene projekta ili ugrađene opreme.

Brodogradnja se od ostalih industrija razlikuje po svojoj posvemašnjoj slojevitosti. Projektiranje, gradnja, upravljanje, održavanje i osuvremenjivanje brodova može se usporediti samo djelomično s ostalim sektorima no nikada u svojoj cijelosti i tijekom cjeloživotnog ciklusa.

Kod planiranja procesa gradnje i opremanja broda, cjelokupna kompleksnost procesa može se usporediti s procesnom industrijom ili proizvodnjom hrane gdje sve mora biti planirano i testirano unaprijed prije ugradnje i stavljanja u pogon.

Smatra se da je svjetska brodograđevna industrija zakoračila prema novoj industrijskoj revoluciji nazvanoj *Brodogradnja 4.0* [2]. *Brodogradnja 4.0* na principima *Industrije 4.0* utječe na promjene u projektiranju, proizvodnji, operabilnosti, brodarstvu, uslugama, proizvodnim sustavima, održavanju i sveobuhvatnoj promjeni lanca vrijednosti procesa.

Utjecaj nove industrijske revolucije na brodograđevni proces, potaknute digitalizacijom, optimizacijom i povezivanjem prema procjenama u slijedećih 10 ili 20 godina, imat će za posljedicu potpunu promjenu u načinu izrade i eksploatacije brodova [2].

Zbog posvemašnje slojevitosti promjena koje donosi 4. industrijska revolucija u industriji a poglavito u brodogradnji, trenutno je skromna dostupna literatura i publikacije (poglavito zbog svoje povjerljivosti) koje se bave razmatranjem metodologije implementacije elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* na brodograđevnu industriju.

Predmet ovog rada je stoga istražiti postojeće stanje i utjecaj *Industrije 4.0*, prema *Brodogradnji 4.0*, te predložiti metodologiju optimalnog postupka implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, a sve to u okvirima virtualnog modela na računalu, u vrlo ranoj fazi prije aktiviranja financijskih sredstava i nabavke stvarne opreme za provođenje implementacije. Ovakav pristup u vrlo ranoj fazi projekta daje važne podatke menadžmentu brodograđevnog procesa prilikom odlučivanja o investicijama u nove tehnologije kao i utjecaj na poslovne odluke i odabir optimalnog rješenja uvažavajući postojeća ograničenja, sve kako bi optimalno rješenje bilo primjenjivo i razumljivo donosiocima odluka [3, 5].

1.2 Pregled dosadašnjih istraživanja

Poznato je da su današnja brodogradilišta vrlo složeni sustavi koji su u fazi velikih promjena. Operateri flote razmatraju potrebe za razvojem energetski učinkovitih, pouzdanih i ekološki prihvatljivih brodova s ukupno boljim performansama i nižim ukupnim operativnim troškovima [4]. Brodogradilišta diljem svijeta također se suočavaju s brojnim izazovima i velikom konkurencijom. Danas čak i najnaprednija brodogradilišta shvaćaju da ukoliko žele zadržati vodeću ulogu i postići prihvatljivu profitabilnost moraju znatno povećati produktivnost [5].

Za svaki novi brod važno je u što ranijoj fazi napraviti procjenu izvedivosti, definirati period procesa gradnje i utrošak radnih sati. Procjena izvedivosti treba se izraditi već u fazi projekta, kako bi se uočili svi preduvjeti neometane izgradnje i funkcionalnosti projekta. Brodovi su skupe investicije koje se grade namjenski s određenim ciljem obično u dužem vremenskom periodu (uglavnom dulje od jedne ili dvije godine) s obzirom na buduće područje plovidbe broda (Polarna područja, Tropi) [6].

Važna je tendencija prilagodbe brodograđevnog procesa trendovima koji grabe velikim koracima naprijed uz pomoć digitalnih tehnologija, sve kako bi se održala konkurentnost [7].

Bez obzira na sektor ili regiju, budućnost predstavlja digitalizacija procesa, nadzor nad troškovima već u početnoj fazi projekta i mogućnost brzog reagiranja na promjene koje se događaju tijekom procesa proizvodnje. Ovo će biti jedan od uvjeta za postizanje vodeće pozicije na tržištu. Diljem svijeta, u proteklih nekoliko desetljeća, brodogradnja je reagirala na razne načine unaprjeđenja i razvoja [8].

Svim navedenim izazovima više se ne može upravljati ekonomično s tradicionalnim metodama i procesima u brodogradnji. Promjene koje se očekuju s novom industrijskom revolucijom prema dostupnoj literaturi zahtijevaju od brodograđevnog sektora korjenite promjene u svim segmentima procesa [1]. Kako je paradigma tek u fazi upoznavanja sa primjenom odabranih elemenata koncepta, a za promjene su nužna određena financijska sredstva i ulaganje u tehnologiju, s razmatranjem implementacije krenula je uglavnom vojna industrija kao pokretač svih naprednih promjena u brodogradnji [9].

Može se reći da uspješnost brodogradilišta trebaju graditi upravo na takav način, ne samo graditi brodove prema kupčevim željama, nego i stvarati svoje kupce za svoje buduće ciljane proizvode odnosno brodove [10, 11].

Te promjene su već prepoznala najveća Europska brodogradilišta. Tržišni trendovi mogu ukazati na potencijalne potrebe kupaca. Poslovne odluke su povezane uvelike s rješenjima za pametne brodove, koji trebaju biti proizvedeni u pametnim brodograđevnim procesima.

Konvencionalnim postupkom uobičajeno je razmatrati primjenu novih rješenja temeljem usporedbe s drugim proizvođačima koji su primijenili neku sličnu tehnologiju koja se razmatra [12,13].

Paradigma *Industrije 4.0* prema *Brodogradnji 4.0* i primjeni na brodograđevni proces u fazi je pažljivog razmatranja primjene na nižim operativnim razinama i trenutno ne postoji sustavno znanstveno istraživanje o primjeni koncepta *Brodogradnja 4.0* na brodograđevnu industriju.

Polazište predloženog istraživanja autorica temelji na dosadašnjem višegodišnjem stručnom radu u izučavanju koncepta *Industrija 4.0*, *Brodogradnja 4.0*, *Brodogradilište 4.0* i analiziranja mogućnosti primjene odabranih elemenata koncepta *Industrije 4.0* u brodograđevnoj industriji. Na temelju dobivenih spoznaja utvrđuje da postoji potreba za iznalaženjem prikladne primjenjive metodologije za implementaciju odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* na odabrani brodograđevni proces.

1.3 Cilj istraživanja i hipoteza istraživanja

Osnovni cilj istraživanja:

Osnivanje i prijedlog metodologije za odabir optimalnog postupka implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* uz primjenu i prilagodbu odabranih metoda i alata operacijskih istraživanja.

Hipoteza istraživanja:

„Moguće je razviti model metodologije za odabir optimalnog postupka implementacije koncepta Brodogradnja 4.0, temeljen na metodama višekriterijskog odlučivanja i simulacijskog modeliranja“.

Predložena metodologija sugerira odabir optimalnog postupka implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* koje vode prema skraćenju vremena gradnje broda, podizanju kvalitete proizvodnje, smanjenju ponavljajućih radnji, smanjenju grešaka u proizvodnji, uštedi utroška električne energije, smanjenju rizika za zaposlenike, korištenju novih tehnologija, poboljšanju usluga informatičkih tehnologija te u konačnici nuđenje brodova sa skraćenim procesom gradnje što znači povećanje konkurentnosti na tržištu. Proces strateškog razvitka poslovanja predstavlja vrlo složen proces za kojeg su potrebna znanja, stručnost i vještine posloводства najviše razine.

1.4 Metodologija istraživanja

U radu je metodologija istraživanja i dokazivanje postavljene hipoteze provedeno na slijedeći način:

1. opis problema i istraživanje u literaturi,
2. istraživanje značajki promjena koje se događaju u brodogradnji,
3. istraživanje anketiranjem o postojećem stanju industrije s osvrtom prema primjeni koncepta četvrte industrijske revolucije u brodogradnji,
4. razvoj originalnoga modela redoslijeda implementacije koncepta *Brodogradnja 4.0* na odabrani brodograđevni proces,
5. određivanja cilja, kriterija i odabranih elemenata koncepta primjenom metode višekriterijskog odlučivanja (*eng. AHP*),
6. osnivanje modela za simulacijsko modeliranje,
7. provjera primjenjivosti metodom simulacijskog modeliranja,
8. izrada prijedloga metodologije implementacije nekog od odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* na odabrani brodograđevni proces,
9. analiza modela i predložene metodologije.

U radu za dokazivanje postavljene hipoteze korištene su slijedeće znanstvene metode:

1. metoda indukcije i dedukcije,
2. metoda analize i sinteze,
3. teorija procesnog pristupa,

4. metoda ankete eksperata,
5. statističke metode,
6. iskustvene metode,
7. matematička metoda višekriterijskog odlučivanja.
8. simulacijsko modeliranje u analizi primjene koncepta.

1.5 Očekivani znanstveni doprinos

Primjenom predložene metodologije očekuje se unaprjeđenje procesa implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* na primjeru analiziranog slučaja u brodogradnji koje će rezultirati ponuđenim prijedlozima rješenja za ostale segmente brodograđevnog procesa:

- utvrđivanje optimalnog postupka implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* u brodograđevnom procesu,
- optimizacija redoslijeda poslovnih tijekova unutar brodograđevnog procesa,
- utvrđivanje pouzdanosti odabira rješenja prilikom donošenja relevantnih odluka za implementaciju i reorganizaciju koncepta, uzimajući u obzir sve sličnosti i različitosti koje posjeduje većina brodogradilišta.

Primjena predložene metodologije rezultirat će poboljšanjem optimalnog procesa implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*. Odabranim rješenjem želi se poboljšati iskorištenost postojećih resursa s predlaganjem smjernica prema novom modernom brodograđevnom procesu.

Predlaganjem metodologije za implementaciju koncepta temeljenog na analitičkom hijerarhijskom procesu i simulacijskom modeliranju želi se znatno olakšati i ubrzati razvoj i primjenu znanstvenih metoda i alata u projektiranju i unaprjeđenju realnih brodograđevnih procesa.

Primjenom imenovanih alata za definiranje prijedloga implementacije koncepta potiče se primjena alata operacijskih istraživanja za poslovna rješenja u složenoj, slojevitoj i kompleksnoj industriji kao što je brodogradnja.

1.6 Primjena rezultata istraživanja

Primjena predložene metodologije implementacije koncepta na putu prema modernom brodogradilištu odnosno *Brodogradilištu 4.0*, znanstvenim metodama hijerarhijskog modeliranja i simulacijskog modeliranja, pospješuje iskoristivost postojećih resursa brodogradilišta na putu prema novom modernom brodograđevnom procesu.

Računalni alati za dijagramsku i grafičku simulaciju aktivnosti u brodograđevnom procesu, znatno poboljšavaju donošenje odluka upravama brodogradilišta prilikom razmatranja primjenjivosti predloženih rješenja i poboljšanja uz sva postojeća tehnološka i resursna ograničenja specifična za brodogradilište pojedinačno.

Primjenom predložene metodologije očekuje se unaprjeđenje postupka implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* koja će rezultirati ponuđenim rješenjima na slijedećim područjima:

- utvrđivanje najpovoljnijeg redoslijeda aktivnosti prilikom primjene odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* za tehnološke procese proizvodnih programa u brodograđevnoj industriji,
- optimiziranje poslovnih tokova unutar brodograđevnog proizvodnog procesa,
- povećanje pouzdanosti prilikom donošenja odluka vezanih za projektiranje, modernizaciju i podizanje konkurentnosti postojećeg brodograđevnog procesa.

Osnivanjem i primjenom predložene metodologije temeljene na hijerarhijskom modeliranju i simulacijskom modeliranju, želi se pridonijeti razvoju i sustavnoj primjeni znanstvenih metoda, alata i tehnika u primjenama na proizvodnim procesima a sve prije njihove realizacije u realnom brodograđevnom procesu.

1.7 Struktura doktorskog rada

Doktorski rad strukturiran je u šest međusobno povezanih poglavlja;

U **prvom poglavlju** predstavljen je predmet istraživanja, postavljeni su ciljevi istraživanja i znanstvena hipoteza, navedene su metodologije rješavanja problema, očekivani znanstveni doprinos te je prikazana struktura doktorskog rada.

U **drugom poglavlju** je dan pregled stanja znanja i pregled postojećih istraživanja s detaljnim osvrtom na značajke koncepta *Industrija 4.0* i *Brodogradnja 4.0*.

U **trećem poglavlju** predstavljeno je istraživanje anketiranjem provedeno u periodu 2022 - 2023. godine kako bi se identificirali kriteriji i utjecajni faktori za vrednovanje tehnološke industrijske razine brodograđevne industrije kao i definirali segmenti digitalnih tehnologija najutjecajnije u modernizaciji proizvodnog procesa. Izlazni rezultati korišteni su kao ulazni parametri za četvrto poglavlje.

U **četvrtom poglavlju** korištenjem izlaznih rezultata ankete predstavljen je prijedlog metodologije za odabir smjernica prema *Brodogradnji 4.0* korištenjem analitičkog hijerarhijskog procesa (*AHP*) s definiranjem odabranog cilja, kriterija i odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* kao ulaznih parametara, koji su se uzeli u razmatranje te su potvrđeni analizom osjetljivosti kao provjerom konačnog rješenja.

U **petom poglavlju** se na temelju prethodnih istraživanja predložena metodologija verificira i provjerava virtualnim eksperimentom, te se potvrđuje metodom simulacijskog modeliranja kao optimalnog rješenja primjene odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* za brodograđevni proces.

U **zaključku** je dana ocjena postignutog cilja, predstavljene su mogućnosti primjene predložene metodologije te je analiziran pristup koji uključuje i smjernice za daljnje mogućnosti nastavka istraživanja.

Osim navedenih poglavlja doktorski rad sadrži popis literature, popis slika, tablica, kratica i privitaka.

2. PREGLED STANJA ZNANJA I POSTOJEĆIH ISTRAŽIVANJA

2.1 Od *Industrije 1.0* do *Industrije 4.0*

Prve tri industrijske revolucije rezultat su uvođenja strojeva, električne energije i informatičke tehnologije. Gospodarski rast i razvoj od 1. industrijske revolucije do danas razvijao se parcijalno kroz prethodnih 200 godina [15, 16].

1. industrijska revolucija krajem 18. st. do prve polovice 19. st. rezultirala je prijelazom s ručne proizvodnje na strojnu proizvodnju. Proizvodnja se formira u tvornicama, gdje se stvara masovna proizvodnja. Komunikacija i razmjena informacija ostaje na analognom i usmenom prijenosu informacija i uputama za rad.

2. industrijska revolucija započela je 1870. godine, trajala je do 1914. godine. Osnauje se uporaba čelika, željeza, te se započelo s gradnjom čeličnih konstrukcija, strojeva i brodova te uvođenje linijske proizvodnje u tvornicama. Uvodi se podjela poslova i masovna proizvodnja uz pomoć električne energije.

3. industrijska revolucija od 1914. godine do kraja 20. stoljeća donijela je daljnju automatizaciju proizvodnje primjenom elektronike i informacijske tehnologije (*eng. IT*). Proizvodnja se sve više zasniva na računalno potpomognutoj proizvodnji, koja od masovne postaje individualizirana. Razvoj robotike postaje sve napredniji i isplativiji, poglavito u ponavljajućim i fizički teškim radnim procesima [15,16].

4. industrijska revolucija nazvana *Industrija 4.0* započela je i doživljava snažan zamah u svim segmentima industrijske proizvodnje. Obilježena je umrežavanjem pametnih digitalnih uređaja bežičnim putem. Zapravo, pojam *Industrija 4.0* opisuje buduće projekte usmjerene na uspostavljanje bliskog odnosa između IT i proizvodne tehnologije, kako bi se osiguralo da se proizvodne kompanije mogu nositi s budućim izazovima. Prvi put je projekt predstavljen 2011. godine na sajmu u Hannoveru (Njemačka) [4, 17]. Od tada su vlade i industrije širom svijeta pratile novo stvorene trendove, pokušavajući ih primijeniti i razmotriti koristi koje nova industrijska revolucija donosi.

2.2 Industrija 4.0

S početkom 4. industrijske revolucije odmah se potiču mnoga pitanja: Što 4. industrijska revolucija zapravo znači? Kakav ima utjecaj na industrijsku proizvodnju? [14, 15, 16].

Industrija 4.0 je visoko-tehnološka strategija koja promovira digitalizaciju proizvodne industrije. Cilj je pametna tvornica (*eng. Smart Factory*) koju karakterizira prilagodljivost, iskoristivost resursa i ergonomnost, te integracija s kupcem i poslovnim partnerima u poslu i vrijednosti procesa.

Nova tehnološka strategija zasnovana je na kibernetско-fizičkim proizvodnim sustavima (*eng. Cyber-Physical Production Systems - CPSS*) i internetu stvari (*eng. Internet of Things - IoT*), velikoj bazi podataka (*eng. Big Data - BD*), internetu usluga (*eng. Internet of Services - IoS*) te interakciji kibernetскоg i fizičkog svijeta [4, 5, 14, 15].

Industrija 4.0 predstavlja razvoj koji u potpunosti mijenja tradicionalnu industrijsku proizvodnju, projektiranje i tehnologiju. Kupac dobiva proizvod prilagođen svojim potrebama uz povoljnu cijenu i vrlo malo škarta [4, 8].

Za neometano funkcioniranje koncepta, od krucijalne važnosti je vertikalna i horizontalna integracija kroz cijeli lanac vrijednosti, te visoka razina umreženosti i komunikacije između strojeva i usluga [4].

Fokus primjene koncepta *Industrije 4.0* bazira se na slijedećem:

- *Vrijeme*: vrijeme proizvodnje mora se kontinuirano smanjivati,
- *Cijena*: mora se značajno smanjiti,
- *Fleksibilnost proizvodnje*: snažan i brz odgovor na izmjene mora se poboljšavati.

Industrija 4.0 predstavlja sveobuhvatnu promjenu kako se dolazi do proizvoda.

Kagermann definira *Industriju 4.0* kao pametan proizvodni tijek lanca vrijednosti između strojeva u proizvodnom procesu, koji ostvaruju komunikaciju u stvarnom vremenu i proizvoda koji se proizvode u tom procesu [4].

Osnovni preduvjeti za uvođenje koncepta *Industrija 4.0*:

- **Sveprisutna širokopojasna mreža:** Omogućuje razmjenu velike količine industrijskih podataka, često nestrukturiranih, da bi se efikasno prenosile informacije između proizvodnih lokacija za daljinsku obradu [8],
- **Informatički oblak i velika baza podataka:** Visoke performanse kompjuterizacije, pohrane i obrade podataka koja omogućuje efikasnost i procesuiranje ogromne količine proizvoda, marketinga te podatke opskrbnog lanca [4],
- **Kvalificirani stručnjaci:** Stručnjaci trebaju posjedovati specifična znanja i vještine primjerene digitalnoj industriji. Obrazovni sustav visokog školstva će implementirati u obrazovni sustav digitalne tehnologije od najranije dobi [5],
- **Maksimalna iskoristivost raspoloživih resursa poduzeća:** Povećanje iskoristivosti resursa poduzeća, ušteda energije i vode uz smanjenje troškova proizvodnje jako važan u *Industriji 4.0*. Uporaba obnovljivih izvora energije prioritet u tehničkim rješenjima na opremi i proizvodnim procesima.
- **Standardizacija:** Jednoznačnost i jasnoća podataka koji se razmjenjuju; moraju biti jednoznačni i jasni za komunikaciju, prikupljanje velike baze podataka uz odgovarajuća softverska rješenja koja svim upravljaju. Priprema i izrada baze podataka s uspostavljanjem standardizacije nužan je preduvjet za komunikaciju na svim razinama [4, 5, 8].

2.3 Razvoj koncepta *Industrije 4.0*

Koncept *Industrija 4.0* temelji se na nekoliko ključnih elemenata [4]:

- **Standardizacija i referentna arhitektura;** predstavlja povezivanje tvrtki međusobno, razmjena informacija je jednoznačna, jasna, nedvosmislena s razmjenom zajedničkih standarda uz podršku referentne arhitekture,
- **Upravljanje složenim sustavima;** proizvodni procesi postali su vrlo kompleksni, višeslojni, što zahtjeva pomno planiranje, jednoznačne metode i alate te razvoj metoda i alata prilagođenih novim poslovnim sustavima,
- **Sveobuhvatna širokopojasna infrastruktura za industriju; temelj** neometane komunikacije su širokopojasne komunikacijske mreže,
- **Sigurnost i osiguranje podataka;** sigurnost podataka koje razmjenjuju ljudi,

strojevi i proizvodni sustavi, trebaju imati visoku razinu sigurnosti protiv zlouporabe i neovlaštenog preuzimanja podataka,

- **Stalni profesionalni razvoj;** *Industrija 4.0* će promijeniti kompetencije zaposlenika, a cjeloživotno obrazovanje će postati temelj novog organiziranog rada sposobnih zaposlenika [18],
- **Regulatorni okvir;** s pojavljivanjem velike količine inovacija i razmjene velike količine podataka do izražaja će doći međuvezni ugovori između tvrtki ali i zakonska zaštita podataka i vlasnika informacija koje se dijele,
- **Iskoristivost resursa;** najvažniji će biti zaštita okoliša, energetska učinkovita projektna i poslovna rješenja, učinkoviti lanac opskrbe, uštede na iskoristivosti resursa poslovnih rješenja i poslovnih proizvodnih sustava, iskoristivost vremena.

Pametni proizvodni proces koristi fleksibilne i kolaborativne sustave za rješavanje problema i donošenje najboljih odluka [19].

2.4 Industrijska revolucija u brodograđevnoj industriji

Industrija 4.0 (eng. *Industry 4.0*) ima snažan utjecaj na svjetsku industriju i sve aspekte ljudskog društva. Brodograđevna industrija nalazi se na povijesnoj prekretnici.

Sada se industrija priprema za promjene koje će uslijediti u narednih 10 do 20 godina. Veći zahtjevi za projektiranje, izgradnju i eksploataciju brodova važni su za ostvarivanje inovativnih rješenja ključnih za uspjeh i ostvarivanje profita i napretka. Koncept *Industrija 4.0* primijenjen na brodograđevni sektor naziva se *Brodogradnja 4.0* (eng. *Shipbuilding 4.0*) i vrlo je primjenjiv na brodograđevni proces jer kombinira proizvodnju brodske čelične strukture i najnapredniju elektroniku za proizvodnju tehnološki složenih proizvoda [14, 18, 19].

Termin *Brodogradnja 4.0* (eng. *Shipbuilding 4.0*) prvi put je predstavljen na konferenciji “SHIPBUILDING 4.0: DINAMIZACIÓN DE LA CAPACIDAD INNOVADORA DEL SECTOR NAVAL GALLEGO” Ferrol, Spain; 2015 godine, gdje je predstavljen klaster brodogradnje, koji radi na primjeni *Industrije 4.0* na brodograđevni sektor.

Termin nove industrijske revolucije u brodogradnji poznat je pod nazivima: *Brodogradnja 4.0* (eng. *Shipbuilding 4.0*), *Brodogradilište 4.0* (eng. *Shipyard 4.0*), *Pomorstvo 4.0* (*Maritime 4.0*), spominje se u svim segmentima brodograđevnog sektora [2, 14, 20].

Strategija koncepta nove industrijske revolucije razmatra se također kroz viziju "*Broda budućnosti*" (eng. "*Vessel of the Future*") gdje se planira do 2050. godine u Europi što više iskoristiti morske i riječne resurse za transport; proizvodnju hrane s mora (eng. *offshore food production*), istraživanje i eksploataciju energije i minerala, no također i kao alternativu urbanom životu, turizam, proizvodnju i trgovinu.

Osnovna odrednica Broda budućnosti je: *nulta emisija štetnih plinova i energetski efikasan brod, brod bez nesreća*. Predviđen je budžet od 425 miliona Eura u sklopu projekta *Horizon 2020*. Ciljevi koji se ovim projektom žele ostvariti: 80% redukcija emisije CO₂, 100% reduciranje emisije NO_x i SO_x te reduciranje rizika nesreća faktora 10 [21, 22, 23, 39].

Analiza investicija *Industry 4.0* od strane stručnjaka iz McKinseyja ukazuje na značajno potencijalno smanjenje troškova, te ulaganjem u digitalizaciju očekuje se smanjenje operativnih troškova u prosjeku za 3,6% i poboljšanje učinkovitost za 4,1%.

McKinsey također procjenjuje da je povećanje produktivnosti za 3-5% moguće putem ulaganja u Internet stvari (eng. *Internet of Things*), pametne potrošnje energije i daljinskog praćenja i nadzora. Prediktivno održavanje i gotovo vođeno samo-servisiranje također bi mogli smanjiti troškove održavanja za 10% do 40% [23, 24, 26].

2.5 Analiza postojećih istraživanja prema *Brodogradnji 4.0*

Pregled istraživanja o mogućnostima primjene digitalnih tehnologija na brodograđevni sektor kao *Brodogradnja 4.0* predstavljeni u slijedećem dijelu rada prema prikupljenim podacima na nivou država i na nivou pojedinačnih članaka i publikacija:

➤ Procjena je da će Njemačka vlada, kao utemeljiteljice *Industrije 4.0*, u inovacije u brodograđevnoj industriji, uložiti gotovo 12 milijardi eura. Uz visoku stopu izvoza od 74% i dalje stoji potvrda kako je Njemačka jedan od lidera u sektoru međunarodne isporuke brodograđevne opreme. Prema "*Maritime Agenda 2025*" i "*Study on Industrial and Technologies Competences in the Naval Sector*", pomorski sektor ima godišnji promet od 18 milijardi eura od čega 70-80% dodane vrijednosti otpada na brodogradnju [21, 22, 23].

Vojna brodogradnja u Njemačkoj pokretačka je snaga inovacija u brodograđevnu industriju ere *Brodogradnje 4.0*. Fokus je stavljen na istraživanja u području Interneta

stvari (*eng. Internet of Things*), veliku bazu podataka (*eng. Big Data*), standardizaciju, energetske i ekološki prihvatljiva tehnička rješenja za opremu, vertikalnu i horizontalnu integraciju i razmjenu informacija, te posebno na bliži kontakt brodograditelja i dobavljača opreme kao strateških partnera koji razvijaju nova tehnička rješenja zajedno s brodogradilištima [23, 24, 25, 26].

➤ Brodogradilište Meyer Werft u Papenburgu (Peter Behrens, voditelj odjela za standard i tehnologiju) radi na modularizaciji preko 70 blokova konstrukcija. Težište u ovom brodogradilištu stavljeno je na standardizaciju koja predstavlja uštede troškova, smanjenje raznih materijala, točnost izvedbe konstrukcija, te ciljano i pravilno područje primjene. Brodogradilište preko 75% materijala i usluga uzima od vanjskih partnerskih tvrtki (*eng. bridgebuilding suppliers*) koje razvijaju inovativna rješenja za brodogradilište [23, 24, 25, 26].

➤ DNV klasifikacijsko društvo (prof. Volker Bertam) temelj *Brodogradnje 4.0* vidi u izradi nadzora modela digitalnog broda (*eng. Digital Ship*) te u nadzoru samog projekta broda putem digitalnih standardiziranih sučelja.

➤ Brodogradilište u Flensburgu svoje težište stavlja na stvaranje preduvjeta za implementaciju digitalnih tehnologija [23, 24, 26].

➤ Pomorski klaster sjeverne Njemačke, okupio je tvrtke i stručnjake za brodogradnju i zaštitu okoliša s pružateljima poslovnih rješenja kako bi zajedno razvijali načine implementacije koncepta na brodograđevnu industriju. Ulaganje u inovacije i visoko specijalizirana rješenja za brodogradilišta i brodove, s uključenim cjelokupnim lancem vrijednosti poput nabave proizvoda, razvoj, upravljanje gradnjom brodova i logistikom za brodogradilišta, vide kao jedinu alternativnu konkurenciju s istoka [25].

➤ Sveučilište u Wismaru uočilo je da fokus promjena u brodogradilištu treba staviti na analizu predugovornog procesa s izradom specifikacije za brod, projekta i određivanja ugovorne cijene broda [26, 27, 28].

➤ Američke korporacije koje se bave istraživanjem *Brodogradnje 4.0* osnovale su Industrijski internetski konzorcij (*eng. Industrial Internet Consortium-IIC*), a pet od njih je započelo s osnaživanjem tržišta interneta stvari (*eng. IoT*) u brodograđevnoj industriji. U vojnoj brodogradnji povećan je sadašnji cilj izgradnje brodova s 308 na 355 brodova na godinu. Predviđa se da će brodovi nove generacije izgrađeni u okruženju *Brodogradnja 4.0* trajati duže i biti prilagodljiviji promjenama tijekom cijelog životnog ciklusa. I ovdje vojna brodogradnja predvodi istraživanja primjene tehnologija *Brodogradnje 4.0*. Najveće

vojno brodogradilište Newport News Shipyard – NNS, predvodi u digitalizaciji brodogradnje. Primjenom novih tehnologija očekuju se uštede od 15% u odnosu na tradicionalne brodograđevne metode [27, 28].

➤ Kineska vlada izdala je u 2015. godini strategiju "*Made in China 2025*". Direktno je povučena iz Njemačke strategije *Industrije 4.0*. Plan je stvaranje inovacijskih centara od planiranih 15 u 2020. godini do čak 40 centara do 2025. godine. *Brodogradnja 4.0* obuhvaća istraživanja u primjenu 5S sustava brodograđevnog sektora. 5S brodski operativni inteligentni servisni sustav (*eng. Ships Operational Intelligent Service System - SOISS*) koji uključuje more (*eng. Sea*), brod (*eng. Ship*), sustav (*eng. System*), pametni (*eng. Smart*) i usluge (*eng. Services*) [29, 30]. Strategija istraživanja orijentirana je na procjenu sigurnosti broda (*eng. Ship Safety Assessment*), praćenje energetske učinkovitosti broda (*eng. Ship Energy Efficiency Monitoring*), analizu prikupljenih podataka (*eng. Data Analysis*), procjenu i optimizaciju održavanja (*eng. Assessment and Optimization, Predictive Maintenance*), praćenje pomorske rute (*eng. Sae route*), navigaciju plovidbe broda i operativnu kontrolu (*eng. Navigation and Operational Control*), sve povezano putem velike baze podataka (*eng. Big Data*). Isporuka prvog pametnog broda izgrađenog prema konceptu *Brodogradnja 4.0* trebalo se realizirati krajem 2018. godine [29, 30, 31].

➤ Korejska vlada je krajem 2015. godine na temelju koncepta *Industrija 4.0* donijela strategiju "*Manufacturing Inovation 3.0 Strategy*". Tri najveća korejska brodogradilišta "*Samsung Heavy Industries*", "*Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering*" i "*Hyundai Heavy Industries*" pod pokroviteljstvom korejske vlade, 2015. godine pokrenula su zajedno sa studentima sveučilišta, novi Ulsan inovacijski centar posebno posvećen inovacijama u brodogradnji. Očekuje se da će istraživanja inovacijskog centra rezultirati sa preko 2500 patenata posvećenih izgradnji pametnih brodova u pametnom *Brodogradilištu 4.0*. Istraživanja obuhvaćaju primjenu novih tehnologija kao što je 3D print i proizvodnja za 15 glavnih komponenti broda. HHI procjenjuje da će ovako lokalizirana proizvodnja korejskoj brodogradnji uštedjeti do 1,8 milijardi dolara godišnje [32, 33].

➤ Španjolska je 2014. godine u Galiciji pokrenula Agendu za industrijsku konkurentnost (*eng. Agenda for Industrial Competitiveness*), kao alat za planiranje, industrijsku politiku koju provodi Xunta de Galicia u razdoblju od 2015. do 2020.

godine. ACLUNAGA (eng. *Cluster Association of Naval Galicia*) u suradnji galicijske inovacijske agencije GAIN, IGAPE i AIMEN tehnološkog centra, započelo je s istraživanjima mogućnosti primjene *Brodogradnje 4.0* u 2016. godini. Ferrol vojno brodogradilište Navantia, predvodnik je promjena u brodograđevnom sektoru. Do sada objavljena istraživanja koje zajednički provode Navantia i UDC (Spain. *Universidad da Coruña*) prikazala su rad na primjeni kibernetско-fizičkih sustava (eng. *Cyber-Physical Systems*) posebno RFID (eng. *Radio Frequency Identification*) i praćenju proizvodnje više od 40 000 različitih cijevi ugrađenih na brod [9, 34, 35, 39].

➤ Australaska transformacija brodogradnje odvija se u najvećem australskom vojnom brodogradilištu Adelaide, započelo je 2018. godine ulaganjem od 1,5 milijardi australskih dolara u projektiranje i inženjering digitalnih tehnologija, kako bi postali najnaprednije vojno brodogradilište na svijetu. Skoro 100 miliona australskih dolara bit će uloženo u informacije i tehnologije [24, 35, 36].

2.6 Tehnologije *Brodogradnje 4.0* (elementi koncepta)

Ključne tehnologije *Brodogradnje 4.0* prenesene iz *Industrije 4.0* karakterizira proizvodnja i usluge pomoću visoke razine automatizacije i digitalizacije procesa, elektronika i IT [18,19, 37]. Za proizvodni proces od ključne je važnosti autonomna interoperabilnost, agilnost, fleksibilnost, odlučivanje, učinkovitost, smanjenje troškova i samooptimizacija. Prema Harvey Mackay-u američkom biznismenu, glavni razlog za digitalizaciju je ušteda vremena koja znači manje novca potrošenog na resurse čime se stvara dvostrana konkurentска prednost [37, 38, 40].

Osnovne značajke i posebno odabrani elementi koncepta *Brodogradnja 4.0* [5, 7, 8, 18, 19, 35, 39, 40]:

- ***Internet stvari (eng. Internet of Things - IoT)***

Internet stvari (eng. *Internet of Things*) veza je "interneta" i "stvari", predstavlja mrežu, mreža. IoT ostvaruje globalni sustav povezan putem RFID-a (eng. *Radio Frequency Identification*) bežičnim senzorskim mrežama. Senzori povezani mrežom kao infrastrukturnom podrškom, omogućuju povezivanje svih "stvari", dijeljenje i razmjenu podataka. Servisne usluge podržavaju aplikacije kojima se razmjenjuju i obrađuju podaci. Povezanost ostvaruju ljudi, stvari i uređaji putem interneta kako

interno u tvrtki tako i s dobavljačima, objektima, kupcima i strojevima međusobno (*eng. Machine to Machine - M2M*).

Internet stvari omogućuje istovremeno razvoj procesa, proizvodnje, proizvoda, montaže, isporuke i uporabe proizvoda.

Ugradnjom sve više senzora u stvari, uređaje, opremu i alate koji se međusobno povezuju putem bežične internetske veze (*eng. Wi-Fi*) predstavlja se preduvjet stvaranja Interneta stvari (*eng. IoT*). Spajanjem što više uređaja na Internet, prikuplja se velika količina podataka koja omogućuje upravljanje, ažuriranje povezanih uređaja i donošenje odluka [8, 40].

- **Kibernetско-fizički proizvodni sustavi (*eng. Cyber-Physical Production Systems-CPS*)**

- Kibernetско-fizički proizvodni sustavi (*eng. Cyber-Physical Production Systems*) povezuju fizički svijet povezan senzorima i kibernetски svijet koji predstavlja računalnu sliku zabilježenu senzorima. Sustav se zasniva na međusobnoj integraciji računalnog i fizičkog. Putem računala kontroliraju se procesi koji povratno donose informacije i ažuriraju u stvarnom vremenu podatke u računalima i pripadne proračune na osnovu kojih su procesi formirani. Fizički i računalni sustavi su bežično povezani putem interneta. Sustav se samo-upravlja s kontrolom u stvarnom vremenu, sposoban je samo-optimizirati se.

Kibernetско-fizički sustavi predstavljaju računalne, mrežne i fizičke komponente integracije procesa, gdje umreženi sustavi nadziru i kontroliraju fizičke procese i vraćaju proizvodne podatke natrag u proces kako bi osigurali razmjenu informacija u stvarnom vremenu [4, 40].

- **Digitalni blizanac (*eng. Digital Twin - DT*)**

Digitalni blizanac (*eng. Digital Twin*) ključan je koncept za *Brodogradilište 4.0*. Sastoji se od 3D modela fizičkog proizvoda u 3D virtualnoj stvarnosti. Dok se podaci unose za *Twin*, razvijaju se podaci o načinu korištenja fizičkog proizvoda te prilagođavaju uvjetima okoliša kojima će fizički proizvod biti izložen. Stvaranjem virtualnog modela povezanog s raspoloživim resursima, digitalni blizanac daje pametnim proizvođačima uvide u stvarnom vremenu o podacima potrebnim za brzo

donošenje proizvodnih odluka, izostankom kašnjenja povezanih s fizičkim proizvodima poput hardvera, rada, materijala i sl.

Ovo je osobito korisno u digitalnom brodogradilištu zbog veličine i opsega segmenata uključenih u brodograđevni proizvodni proces. Model pomaže projektantima predviđanja i simulacije ključnih segmenata projekta, kao što su rute bijega, skladištenje, transport, vodonepropusnost pregrada itd. Izradom digitalnog blizanca projektantima je omogućeno predviđanje potencijalnih grešaka; mnogo prije no što se dogodila fizička gradnja broda. Na ovaj način drastično je skraćeno vrijeme i rad fizičke izgradnje [39, 40, 41].

- ***Kibernetaska sigurnost (eng. Cyber Security - CS)***

Brodograđevna industrija sve više se oslanja na digitalizaciju, integraciju i automatizaciju, čime se snažno povećava rizik od kiberneteskog napada. Preveniranje je metoda suočavanja s rizikom kibernetске sigurnosti. Kibernetaska sigurnost (*eng. Cyber Security*) unaprijed analizira svaki sustav na brodu sa stajališta kibernetске sigurnosti, jamčeći da se izgradnja i eksploatacija odvija integrirano i u skladu s drugim sustavima. Uranjenim softverskim proračunima uzimaju se u obzir sve opasnosti koje bi mogle ugroziti gradnju i eksploataciju broda, čime se potencijalno osigurava čuvanje povjerljivosti podataka. Kibernetaska sigurnost uključuje sve „stakeholdere“ koji su dio procesa gradnje broda od kupca, brodogradilišta, proizvođača opreme [41, 42].

- ***Velika baza podataka (eng. Big Data - BD)***

Velika količina generiranih podataka (*eng. Big Data*) prikupljenih iz međusobno povezanih heterogenih objekata. Prikupljeni podaci strukturirani su, polustrukturirani ili nestrukturirani i predstavljaju temelj velike baze podataka (*eng. Big Data*) [8].

Prikupljanje velike količine podataka putem interneta, raste i udvostručuje se svakih 26 mjeseci [19]. Ekspanzija velike količine podataka koja će se u budućnosti obrađivati, mora se negdje pohraniti, obraditi, analizirati i prezentirati. Obrada i formiranje velike količine podataka omogućuje optimiranje kvalitete proizvoda i proizvodnje, uštedu energije, smanjenje grešaka i škarta te znatno poboljšanje usluga.

Izazovi prikupljanja i obrade velike količine podataka uključuju prikupljanje podataka, pohranu podataka, analizu podataka, pretraživanje, dijeljenje, prijenos, vizualizaciju, ažuriranje, privatnost i izvor podataka. Velika količina podataka postaje standard kako bi se omogućilo raspolaganje informacijama pravovaljano, te donošenje

odluka u realnom vremenu. Velika količina podataka pruža smjernice za povezane proizvodne aktivnosti unutar cjelokupnog životnog ciklusa proizvoda [43, 44].

- ***Virtualna i proširena stvarnost (eng. Augmented Reality/Virtual Reality - AR/VR)***

Sustav proširene stvarnosti (*eng. Augmented Reality*) spaja stvarno okruženje s virtualnim informacijama (*eng. Virtual Reality*) i pruža proširenu informaciju s pogledom na korisničko okruženje, čime se omogućuje lakše razumijevanje podataka i interakciju procesa proizvodnje i kasnije eksploatacije. Virtualna i proširena stvarnost stvaraju fizičko okruženje stvarnog svijeta, prošireno superponiranim informacijama računalno generirane slike. Temeljena je na softveru i može se isporučiti korisniku putem računalnog oblaka. Povezuje stvarne i virtualne objekte, omogućuje interaktivnost u stvarnom vremenu i omogućuje korištenje 3D modela i 3D objekata [40, 45].

- ***Aditivna proizvodnja (eng. Additive manufacturing - AM)***

3D printanje ili aditivna proizvodnja (*eng. Additive manufacturing*) širi se na sve grane proizvodnje jer postaje sve pouzdaniji način izrade. Prednost aditivne proizvodnje je optimizacija dijelova, smanjenje težine i jednostavnost izrade prototipova. Svaku od primjenjenih tehnologija karakteriziraju različita svojstva konačnog proizvoda. Strojevi za aditivnu proizvodnju skupi su, no postižu visoku kvalitetu proizvoda i osiguravaju povrat ulaganja. Tehnologija i materijali koji se koriste trebaju biti pažljivo odabrani na osnovu potrebne čvrstoće, fizičkih svojstava, financijskih pretpostavki i namjene konačnog proizvoda. Trenutno se primjena u brodogradnji ograničava na manje segmente opreme poput HVAC-a, sustava obnove energije, obrade ispušnih plinova, komponenti sustava zaštite od korozije, savijanja, pukotina i sl. [46]. Tehnologija aditivne proizvodnje postaje sve fleksibilnija, fokus je stavljen na proizvodnju rezervnih dijelova i dijelova od različitih materijala [40, 46, 49].

- ***Autonomni transport (eng. Autonomous Vehicles - AVS)***

Samovozeća bezposadna autonomna transportna vozila (*eng. Autonomous Vehicles*) ili automatizirano vođena vozila u brodogradnji, globalni su trend i vizija brodogradilišta budućnosti. Trenutno je snažan zamah razvoja autonomnih

transportnih vozila na cestama. Transformacija tehnologije za autonomni transport u brodogradnji, razvija se u smjeru opremanja vozila s laserima i kamerama, te razvoj i ulaganje u tračnice i staze za navođenje. Primjer je The Hook terminal u Rotterdamu, s prvim automatiziranim brodogradilištem Maasvlakte II koji upotrebljava pametne senzore pokretane snagom vjetra i drugih obnovljivih izvora energije za premještanje tereta [47, 48, 50].

- ***Modeliranje i simuliranje proizvoda i procesa (eng. Modelling & Simulation of Production Processes - MSP)***

Zbog svoje posvemašnje složenosti, brodovi opremljeni modernim alatima i sustavima zahtijevaju ubrzanje procesa gradnje sa što kraćim ciklusom projektiranja, uz zadovoljenje svih sigurnosnih standarda za vrhunsku opremu, brzinu, kapacitet, navigaciju i operabilnost broda. Modeliranje i simuliranje proizvoda i procesa (*eng. Modeling & Simulation of production processes*) omogućuje projektantima visok stupanj uvida i izvedbe virtualnim testiranjem na računalu, a prije samog početka projektiranja broda i brodograđevnog proizvodnog procesa. Virtualne simulacije broda i proizvodnog procesa omogućuju sagledavanje složenosti proizvoda i procesa u vrlo ranoj fazi, znatno prije potpisa ugovora. Korištenje modelskih i simulacijskih tehnologija omogućuje velike uštede vremena, materijala i resursa [40, 49].

- ***Robotska automatizacija procesa (eng. Robotic Process Automation - RPA)***

Robotska automatizacija procesa (*eng. Robotic Process Automation*) podrazumijeva uporabu različitih vrsta robota u brodograđevnom procesu s naglaskom na razvoj i primjenu. Roboti se primjenjuju na otvorenim konstrukcijama poput kolica za zavarivanje, zglobnih manipulatora, autonomnih manipulatora i sl. Roboti za zatvorene prostore koriste se sa njihovim samohodnim mehanizmima za teško pristupačna ili nepristupačna mjesta. Autonomni, mobilni i fleksibilni roboti koriste se za zavarivanje, nadzor zavarivanja; automatizirani roboti za zavarivanje na linijama opremljeni su strojnim vidom i prepoznavanjem značajki 3D modela. Za ponavljajuće ili dugotrajne zadatke primjena ove tehnologije predstavlja znatnu uštedu vremena uz ergonomsku zaštitu zaposlenika [50].

- ***Fleksibilnost proizvodnog procesa (eng. Production Process Flexibility - PPF)***

U usporedbi s tradicionalnim brodograđevnim procesom digitalizirani proizvodni proces temeljen je na fleksibilnosti montažnog procesa (*eng. Production Process Flexibility*) temeljen na tehnologiji online detekcije. Preduvjeti fleksibilnog inovativnog brodograđevnog proizvodnog procesa su digitalni dizajn i simulacija. Implementacija digitalne tehnologije gradnje broda nužan je preduvjet za pametan brodograđevni proces. Poseban naglasak fleksibilnog proizvodnog procesa je čvrsta integracija između projekta i gradnje broda gdje se simulacijom predviđaju potencijalne greške u procesu, koje se pravovremenom i brzom izmjenom u brodograđevnom tehnološkom procesu preveniraju i ažuriraju u cilju neometanog tijeka proizvodnje. Digitalnu fleksibilnu proizvodnju karakteriziraju brzi odziv, visoka kvaliteta, niska cijena i dobra fleksibilnost. Digitalno modeliranje, izrada digitalnih prototipova, proizvodnja metodom digitalne kontrole, testiranje virtualnim prototipovima i digitalnom simulacijom, predstavljaju glavne elemente modernog fleksibilnog brodograđevnog proizvodnog procesa [51].

- ***Pametno napredno planiranje u vremenu (eng. Smart Real Time Planning - SRP)***

Pametno napredno planiranje (*eng. Smart Real Time Planning*) upravlja cjelokupnim brodograđevnim procesom od projektiranja do gradnje broda. Planiranje brodograđevnog procesa je složen dinamički proces koji se često mijenja. Po nekim procjenama stopa promjene planiranja se kreće od 30% do 70%, te kao rezultat može biti znatno smanjenje efektivnosti procesa. U digitalnom brodogradilištu alati za pametno planiranje brodograđevnog procesa pokrivaju planiranje opterećenja, simulacije procesa, radno opterećenje i štede vrijeme prilikom implementiranja promjena u raznim segmentima procesa. Cilj je kreiranje što više linija planiranja automatski čime se u inicijalnom planiranju utroše određeni sati koji kasnije predstavljaju znatnu uštedu i donose pametne odluke koristeći bazu podataka znanja o projektu i gradnji broda. Parcijalnim selektiranjem unutar pametnog naprednog planiranja dobivaju se samo relevantne informacije za konkretne situacije [52].

- ***Automatizacija i robotizacija procesa skladištenja (eng. Warehouse Automatization and Robotization - WAR)***

Logistička složenost skladišnog poslovanja u brodograđevnom procesu predstavlja izazov zbog svoje fizičke veličine i velikog broja različitih dijelova i odredišta unutar brodograđevnog procesa. Kako brodogradilišta obično ne koriste pravodobno planiranje zaliha, određena količina komponenti mora biti pohranjena u skladištu. Ovdje se pod automatizacijom i robotizacijom procesa skladištenja (*eng. Warehouse Automatization and Robotization*) smatra korištenje viličara i dohvatnih automatskih platformi i robota, robotskih dohvatnih ruku, koji su programirani za sinkronizirani rad, a odluke se donose centralizirano. Ovakvim digitalnim skladištenjem poboljšava se radna učinkovitost, izbjegavaju netočni tijekovi odvijanja skladišnog procesa, smanjuje se otpad, povećava učinkovitost uz produktivniji i precizniji rad. U kombinaciji sa strojevima moguće je koristiti dronove za preuzimanje predmeta, odlaganje novih predmeta ili kontrolu inventara [53, 54].

- ***Progresivno RFID povezivanje (eng. Progressive RFID interconnectivity - PI)***

RFID (*eng. radio frequency identification*) je tehnologija koja se koristi za identificiranje objekata putem radiofrekvencijskih valova (*eng. RFID*), odnosno predstavlja oblik bežične komunikacije koji uključuje korištenje elektromagnetskog ili elektrostatičkog spajanja u radiofrekvencijskom dijelu elektromagnetskog spektra za jedinstvenu identifikaciju predmeta. Odlikuje se uporabom u automatskim operacijama zbog svoje fleksibilnosti i sposobnosti rada u različitim klimatskim uvjetima, jednostavnom uporabom i visokom razinom sigurnosti koja daje pouzdanost uporabi [55, 56, 57]. Omogućuje sigurnu komunikaciju i prijenos informacija u stvarnom vremenu. Smanjuje se ili eliminira ponavljajući fizički rad čovjeka, što predstavlja priliku za uštede i povrat ulaganja u ovu bezmrežnu tehnologiju. Sastavni dio RFID tehnologije su komponente odašiljača, senzora, čitača i propisanih oznaka.

Uporabom mobilnih alata te korištenje WiFi tehnologije omogućuje se brza izmjena informacija i sniženje troškova opreme za komunikaciju. Pravovremeni pristup informacijama u brodogradilištu i njihova distribucija prema korisnicima (operater, voditelj radionice, rukovoditelj) predstavlja stratešku uštedu u vremenu, eliminiranje pogrešaka,

pravovremenu identifikaciju mogućih problema (uska grla, neusklađenost) [57, 58, 59, 60].

- ***Rad u sigurnom oblaku (eng. Cloud Computing - CC)***

Sigurni oblak (*eng. Cloud Computing*) predstavlja infrastrukturu za dijeljenje i upravljanje proizvodnim resursima kao što je mogućnost izrade opreme, aplikacija, alata, *know-how*; čime svi podaci unutar kompanije postaju pristupačni svima.

Prikupljanje podataka u oblaku odnosi se na računalne resurse velikih informatičkih centara i njihovih pružatelja usluga čime je omogućeno formiranje rezervnih resursa za dijeljenje.

Za prikupljanje i obradu podataka u stvarnom vremenu svaki korisnik (u ovom slučaju segmenti brodogradilišta) formira svoju prilagođenu platformu. Spremanje podataka u oblaku predstavlja poveznicu između pametnih uređaja i velikog razmjera prikupljenih podataka. U oblaku postoji mogućnost masivne pohrane podataka i komunikacijske mogućnosti prema pružatelju usluga. Mogućnosti današnjice i 5G mreže, te prijenos velike količine podataka u stvarnom vremenu omogućuju autonomnost i usluge upravljanja procesom prikupljanja i osiguravanja podataka [60, 61].

- ***Prediktivno održavanje (eng. Predictive Maintenance - PM)***

Prediktivno održavanje (*eng. Predictive Maintenance*) sastoji se od analize postojećih podataka koji koristeći tehnike umjetne inteligencije omogućuju da se dobije uvid u dijelove sustava koje vjerojatno treba održavati prije nego dođe do kvara. Prediktivnim održavanjem izbjegava se mijenjanje komponenti opreme koje su još uvijek upotrebljive, na taj način se omogućuje automatiziranje upozorenja i korektivnih radnji, izbjegava se utjecaj ljudskog faktora i troškovi u smislu nadzora i eventualne krive procjene. Prediktivno održavanje događa se putem konfigurirane platforme za prikupljanje podataka raspoređenih u oblaku koja omogućuje nadzor procesa prikupljanja podataka. Prikupljeni podaci se strukturiraju i transformiraju te prilagođavaju opremi koja se nadzire. Ovakav način poslovanja poboljšava produktivnost, izbjegavaju se zastoji odnosno kontroliraju se i smanjuju troškovi održavanja strojeva [62].

- ***Prediktivna analitika (eng. Predictive Analytics - PA)***

Preditivna analitika (*eng. Predictive Analytics*) može se definirati kao metoda otkrivanja i identificiranja značajnih trendova i karakterističnih obrazaca iz prikupljenih podataka. Uključuje primjenu metode obrade statističkih podataka, programiranje i operacijska istraživanja obično podržana vizualizacijskim podacima za prezentaciju obrađenih podataka [49]. Prediktivna analitika predstavlja uporabu podataka, statističkih algoritama kako bi se utvrdila vjerojatnost budućih ishoda na temelju povijesnih podataka. Analitika koristi prethodne analitičke procese za odabir i pružanje najboljeg rješenja kroz grafove, obradu složenih događaja, neuronske mreže [62, 63, 64].

- ***Podrška donošenju odluka (eng. Decision Making Support - DMS)***

Sustav podrške donošenju odluka (*eng. Decision Making Support*) je računalna programska platforma koja se koristi za poboljšanje sposobnosti donošenja odluka u brodograđevnim kompanijama. Analizira velike količine podataka i predstavlja organizaciju poslovanja odabirom optimalnih mogućih opcija u procesu donošenja odluka. Sustav integrira podatke iz različitih segmenata proizvodnog procesa kako bi korisnicima unutar proizvodnog sustava pružile informacije izvan uobičajenih izvješća, te omogućilo ljudima brže i lakše donošenje informiranih odluka. Ovako prikupljeni podaci više su informacijske aplikacije a manje operativne aplikacije, te pružaju relevantne informacije temeljene na različitim izvorima podataka kako bi podržale donošenje odluka na temelju kvalitetnijih i vjerodostojnijih informacija. Podaci mogu biti prikupljeni iz stvarnog realnog sektora ali isto tako iz potpuno teoretskih istraživačkih simulacija i sustava koji su tek zamišljeni kao predložene nove tehnologije i rizici [65].

- ***Sustav samooptimizacije (eng. Self-Optimization Systems - SS)***

Samooptimizirajući računalni sustavi (*eng. Self-Optimization Systems*) koriste generičke mrežne upravljačke okvire u kojima kontrolne radnje koje upravljaju radom sustava dobivaju samo-optimiziranje ponašanja strojeva i uređaja prema predviđanju unaprijed isprogramiranog matematičkog modela. Primjena sustava ostvariva je na strojevima i uređajima koji se automatski prilagođavaju za upravljanje proizvoljnim dinamičkim procesom. Samo-optimizirajući sustav predstavlja novi koncept u domeni

automatskog upravljanja te omogućuje široku primjenu. Podaci u sustavima mogu se promijeniti čak i tijekom rada, stoga se s uključivanjem različitih metoda kontrole i optimizacije povećava mogućnost samo-optimizacije u različitim fazama proizvodnog procesa. Novija istraživanja fokusirana su na samo-optimizirajuće bežične mreže s fokusom na dugoročne procjene. Moguća je primjena i za praćenje niza parametara okoliša, kvalitetu zraka, rasvjetu, temperaturu i sl. [66, 67]

- ***Integrirana nabava (eng. Integrated Supply Chain - ISC)***

Integrirana nabava (*eng. Integrated Supply Chain*) za *Brodogradnja 4.0* podrazumijeva potpunu integriranu komunikacijsku mrežu informacija i podataka između različitih tvrtki, dobavljača, logistike, odnosno resursa koji maksimiziraju svoju komunikaciju i razmjenu informacija u stvarnom vremenu kako bi se postigla najveća učinkovitost svih uključenih u opskrbni lanac. Održivost integriranog brodograđevnog procesa odlikuje se kroz paradigmu zelenog opskrbnog lanca upravljanja aktivnostima koje obavlja mreža dobavljača s brodogradilištima. Upravljanje lancem opskrbe ogledava se u integriranom i kontroliranom protoku materijala, informacija i usluga između brodogradilišta, dobavljača opreme i distributera koji se međusobno koordiniraju kako bi što učinkovitije izvršili procese skladištenja i distribucije robe i opreme. Integrirani opskrbni lanac omogućuje smanjenje troškova, eliminira se izgubljeno vrijeme, smanjuje utrošak materijala i povećava brzinu odgovora promjenama na tržištu. Nužan preduvjet je snažna horizontalna i vertikalna integracija opskrbnog lanca [68].

2.7 Sažetak

Iz dosadašnjih pregleda istraživanja kroz dostignuća, spoznaje i raspoloživu literaturu vezanu uz odabrane elemente koncepta uočila se problematika nedovoljne primjene suvremenih metoda primijenjenih operacijskih istraživanja i analiziranja metodologije implementacije odabranih elemenata koncepta prema široj primjeni digitalnih tehnologija koncepta *Brodogradnja 4.0* na brodograđevni sektor, te traženja optimalnih implementacijskih postupaka, tehnika i alata.

Najveći dio dosadašnjih i postojećih istraživanja posvećeno je praćenju trendova u drugim industrijama (autoindustrija, farmaceutska industrija, izrada serijskih strojnih komponenata) te djelomično u razmatranju načina i primjene odrednica koncepta na segmente brodograđevnog procesa na nižim operativnim razinama [69, 70, 71].

Nadalje na temelju dosadašnjih istraživanja i razmatranja odabranih elemenata koncepta i digitalnih tehnologija koncepta *Brodogradnja 4.0*, te kroz profesionalni angažman na primjeni digitalnih tehnologija u vojnoj brodogradnji, uočava se potreba cjelovitog analiziranja koncepta *Brodogradnja 4.0* i njegove primjene na brodograđevni sektor. Stoga se izvršio odabir odgovarajućih metoda, tehnika i alata koje imaju za svrhu osnivanje i prijedlog cjelovitog posebno posloženog postupka za implementaciju odabranih elemenata koncepta prema *Brodogradnji 4.0*, strukturiran na način da formiraju točno posloženi postupak procesa implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* primijenjen na brodograđevni proces.

3. VREDNOVANJE RAZINE INDUSTRIJSKE ZRELOSTI PREMA BRODOGRADNJI 4.0

3.1 Istraživanje industrijske zrelosti prema *Brodogradnji 4.0*

Pregledom i istraživanjem trenutno dostupnih izvora uočeno je da se u brodogradnji računalno podržane metodologije nedovoljno koriste, posebno se to odnosi na analiziranje i projektiranje optimalnog postupka implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*. Stoga se odabir metodologije istraživanja formirao s ciljem prijedloga nove metodologije za primjenu, odnosno implementaciju odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* u brodograđevnom procesu te pripadajućih proizvodnih procesa.

U ovom poglavlju predstavljeno je područje istraživanja te postavljen cilj istraživanja u okvirima virtualnog modela na računalu u vrlo ranoj fazi projektiranja bez aktiviranja financijskih sredstava, što omogućuje odabir optimalnog rješenja temeljem postavljenih kriterija.

Usvajanje predložene metodologije rezultiralo bi prihvatljivim investicijama za modernizaciju proizvodnog procesa sukladno postavljenim kriterijima, uz potvrdu simulacijskim modeliranjem kako bi se menadžmentu brodograđevnih procesa ponudila veća pouzdanost kod donošenja odluka.

3.2 Područje istraživanja i faze istraživanja

Prema kreatorima digitalizacije brodograđevne industrije, očekuje se da se dugoročnom suradnjom u razmjeni virtualnih i iskustvenih podataka može povećati obujam proizvodnje za 20 do 25%, do dostižnih 45% u budućnosti što vidljivo znači skraćenje trajanja proizvodnog procesa, no nepoznato je koliko su sudionici brodograđevnog sektora upoznati sa činjenicom industrijskih promjena koje su nastupile [72, 73, 74, 75].

Osnovni cilj istraživanja jest osnivanje i prijedlog posebnog postupka za implementaciju odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* na brodograđevni proces. Predložena metodologija rezultirala bi prihvatljivim investicijama za potrebe modifikacije postojećih proizvodnih brodograđevnih procesa zbog ponuđenih optimalnih rješenja primjene propisanog postupka implementacije odabranih

elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, čime se omogućuje upravama veća pouzdanost prilikom donošenja odluka.

Predložena metodologija zasniva se na provođenju postupka koja se sastoji od četiri faze istraživanja kako bi se došlo do optimalnog rješenja:

- *U prvoj fazi* istraživanja, odabranom metodom anketiranja relevantnih stručnjaka iz svih sektora brodograđevne industrije, znanstvene zajednice i brodograđevnih istraživačkih instituta, prikupljeni su podaci o saznanjima vezanim uz postojeću razinu industrijske zrelosti tvrtki, te o saznanjima vezanim u odabrane elemente koncepta i digitalne tehnologije *Brodogradnja 4.0*. Izlazni rezultati ankete predstavljaju ulazne podatke za slijedeću fazu istraživanja;
- *U drugoj fazi* istraživanja, na osnovu prikupljenih podataka o svim segmentima brodograđevnog procesa i uočenoj razini industrijske zrelosti brodograđevnog sektora, te spremnosti za usmjerenje prema *Brodogradnji 4.0*; temeljem prikupljenih podataka formiraju se posebni težinski faktori odnosno ponderi, kojima se definiraju odnosi bliskosti odabranih elemenata koncepta i predstavljaju posebnost svojim doprinosom zbog svoje primjenjivosti na bilo koji proizvodni proces na kojem se želi ponoviti predložena metodologija. U ovoj fazi generiraju se elementi koncepta koji se razmatraju za optimalni postupak implementacije odabranih elemenata koncepta prema *Brodogradnja 4.0* na odabrani proizvodni proces.
- *U trećoj fazi*, s obzirom na postavljena ograničenja odnosno kriterije hijerarhijskim modeliranjem, korištenjem AHP metode (*eng. Analytic Hierarchy Process*) vrši se analiza i odabir optimalnog postupka odnosno redoslijeda implementacije odabranih elemenata koncepta kao predloženog projektnog rješenja.
- *U četvrtoj fazi* istraživanja, odnosno posljednjoj fazi ovog dijela istraživanja stabilnost predloženog projektnog rješenja odnosno predloženog postupka provjerava se primjenom analize osjetljivosti.

3.3 Uvod u analizu postojećeg stanja brodograđevne industrije

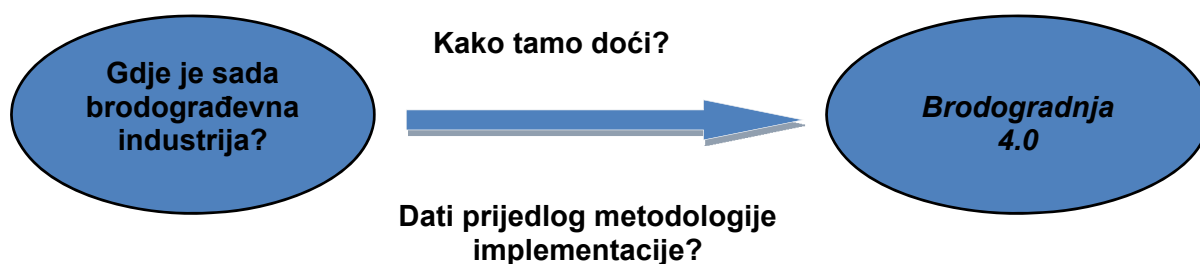
Primjena načela *Brodogradnja 4.0* na brodograđevne tvrtke, brodogradilišta, dobavljače opreme, operatere, vodit će prema najvišoj industrijskoj tehnološkoj razini, zelenoj i vitkoj digitalnoj brodogradnji.

Prema Capgeminijevom nedavnom izvješću, "*pametne tvornice*" analogno "*pametna brodogradilišta*" kao baza nove industrijske revolucije, povećat će globalnu ekonomiju na vrijednost od 500 milijardi dolara. Također, gotovo 76% proizvođača u svijetu već ima neku razinu pametne tvorničke inicijative [76, 77, 78].

Za temelj razvoja metodologije implementacije koncepta izvršeno je istraživanje upitnicima i intervjuima s menadžmentom, projektantima, inspektorima u pojedinim brodograđevnim kompanijama, institutima, klasifikacijskim društvima i dobavljačima brodske opreme kako bi se dobio uvid u trenutno poznavanje, postojeće dosege i razmišljanja o implementaciji odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*.

Prikupljeni i obrađeni rezultati ankete predstavljaju poseban doprinos jer predstavljaju smjernice koje je moguće primijeniti na bilo koji brodograđevni proizvodni proces na kojem se primjenjuje predložena metodologija.

Želi se dati odgovor na pitanje: Gdje smo? Gdje želimo biti? Kako tamo doći? (Slika 3.1.) [82].



Slika 3.1. Osnovni cilj istraživanja

3.4 Anketa

U cilju analize definiran je upitnik koji se nalazi u Privitku br. 1 ovog rada, dok se drugi dio upitnika sa analizom i smjernicama prema *Brodogradnji 4.0* nalazi u Privitku br. 2 ovog rada.

Istraživanjem su obuhvaćene tvrtke širom svijeta, zastupljena su velika i mala brodogradilišta, brodarske kompanije, istraživački instituti, klasifikacijska društva, visokoškolske ustanove i druge razne proizvodne kompanije povezane s brodogradnjom, te su analizirana njihova saznanja o stupnju industrijske zrelosti koju su tvrtke dosegle. Temeljem direktnih kontakata s ispitanicima prikupljena su saznanja

o raspoloživim tehnologijama ali i o digitalnim tehnologijama koncepta *Brodogradnja 4.0* i njihovom utjecaju na industrijski razvoj.

U sklopu istraživanja postavljen je anketni upitnik na web (<https://docs.google.com/forms/>) i poslan na 400 e-mail adresa stručnjaka koji su jednostavnim ispunjavanjem ankete mogli odgovoriti na postavljena pitanja.

Pitanja su jednostavna i strukturirana, traženi su precizni odgovori, te je zbog jednostavnosti pitanja procjena vremena rješavanja 20 minuta.

Primljeno je ukupno 68 odgovora od ispitanika što odgovara uzorku od 17%. Kako je anketni upitnik poslan na poslovne adrese ispitanika, svi su naveli svoje poslovne podatke i pozicije u tvrtkama. Uzorak ispitanika je međunarodnog karaktera stoga su pitanja i odgovori na engleskom jeziku dok su obrađeni rezultati (dijagrami) anketnih odgovora na hrvatskom jeziku.

Anketa je strukturirana na slijedeći način:

- Prvi dio odnosi se na opća informativna pitanja o ispitanicima i tvrtkama koje predstavljaju,
- Drugi dio upitnika odnosi se na procjenu sadašnjeg stanja industrijske zrelosti s obzirom na primjenu raspoloživih tehnologija, alata, računalnih rješenja, razmjenu informacija i podataka,
- Treći dio predstavlja razmatranje smjernica prema najvišoj tehnološkoj razini, rangiranje predloženih odabranih elemenata koncepta prema odabranim kriterijima, procjenu investicijskog troška parcijalne i cjelovite implementacije koncepta temeljem čega se definira postupak formiranja redoslijeda kriterija, odabranih elemenata koncepta s odgovarajućim utjecajnim faktorima.

Posljednji dio ankete strukturiran na način da se dobije uvid u saznanja o elementima i korištenju odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* na razini povezivanja kibernetско-fizičkih komponenti sustava, računalnih softvera i organizacijske prilagodbe tvrtke promjenama koje dolaze. Istraživanje anketom je obuhvatilo i razmatranje primjene vertikalne i horizontalne povezanosti, prikupljanje, prijenos i razmjenu podataka, te smjernice na razini poslovanja, organizacije i koordiniranja u tvrtkama prema *Brodogradnji 4.0*.

3.4.1 Prva grupa pitanja

Prva grupa pitanja odnosi se na općenite i osobne podatke o ispitanicima: *imena i naziv tvrtke, zemljopisni smještaj tvrtke, vrsta poslovanja tvrtke, veličina tvrtke prema broju zaposlenika, visina godišnjih prihoda čime se mjeri uspješnost tvrtke, pozicije i odjela unutar tvrtke u kojem je ispitanik zaposlen, razina i vrsta obrazovanja.*

3.4.2 Druga grupa pitanja

Druga grupa pitanja odnosi se na procjenu postojećeg stanja u tvrtki. U ovoj grupi pitanja analizirana je razina primjene tehnoloških rješenja. Ponuđeni odgovori rangirani su prema razini razvoja tehnoloških rješenja od *Brodogradnje 1.0* do *Brodogradnje 4.0*. U ovoj skupini ponuđeni su odgovori s mogućnošću odabira višestruke ljestvice složenosti industrijskih rješenja. U upitniku je uključena i analiza upravljanja kontrolom kvalitete, planiranje procesa i upravljanja životnim ciklusom proizvoda.

Pitanja su formirana na način da se kao krajnji cilj dobije uvid u trenutno korištenje koncepta *Brodogradnja 4.0* s obzirom na raspoložive resurse i radno okruženje.

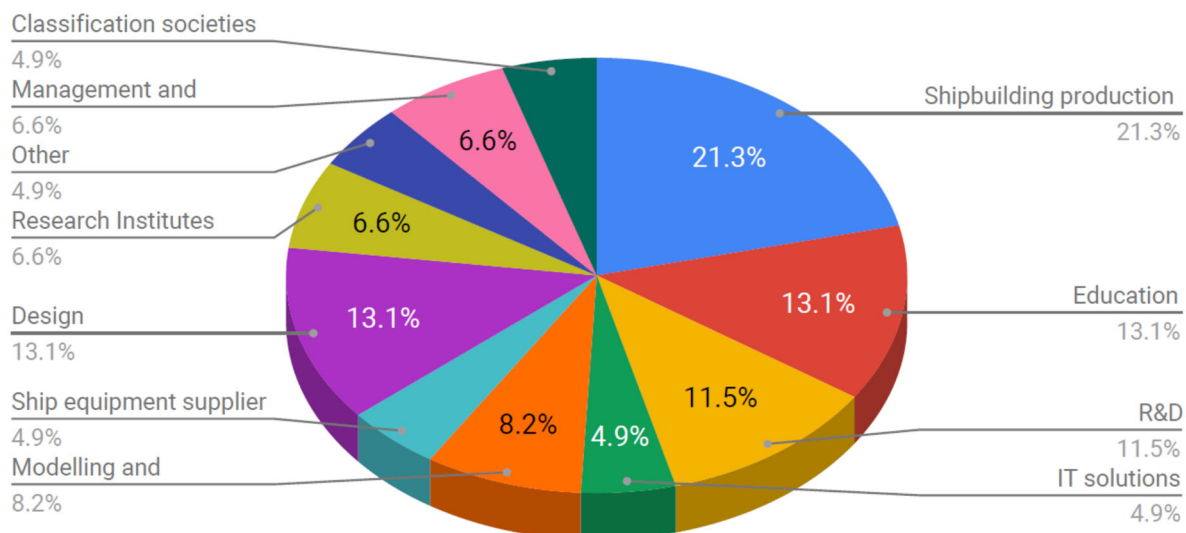
3.4.3 Treća grupa pitanja

Treća grupa pitanja odnosi se na rangiranje elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* prema percepciji važnosti primjene; dana je mogućnost formiranja ljestvice odabranih elemenata koncepta, na prvo mjesto se stavlja odabrani element koncepta za koji ispitanici drže najutjecajnijim (najvažniji) za unaprjeđenje poslovanja tvrtke, dok se na posljednje mjesto stavlja najmanje utjecajan.

U ovu skupinu pitanja uključeno je i istraživanje o važnosti i utjecaju pojedinih kriterija; kriteriji se međusobno uspoređuju te su poslužili za daljnju međusobnu usporedbu odabranih elemenata koncepta koji trebaju optimalno zadovoljiti postavljene kriterije.

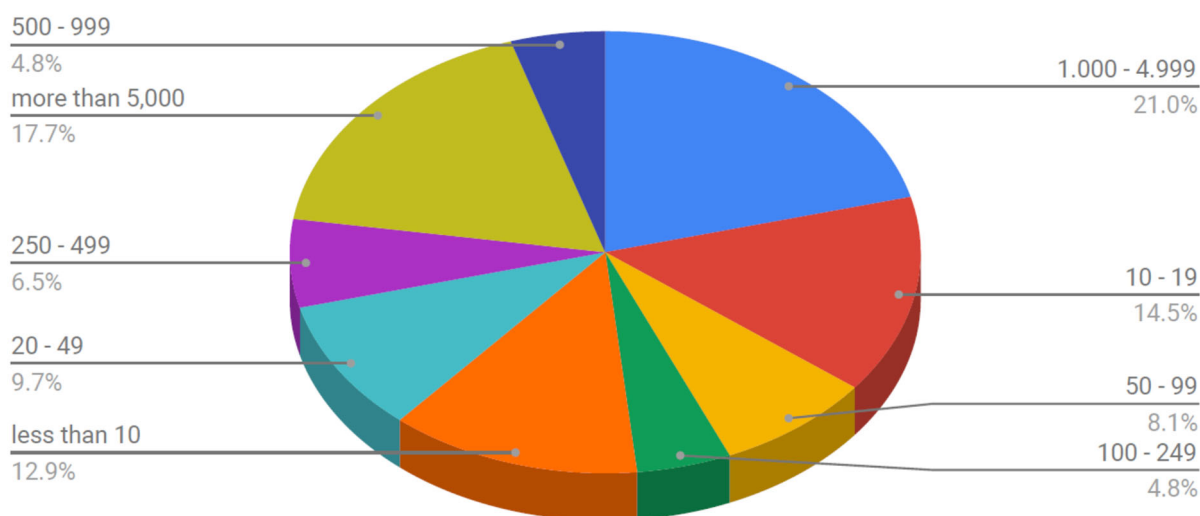
3.5 Obrada podataka – opći podaci o ispitanicima

- Najviše odgovora (23%) dobiveno je od članova uprave pojedinih tvrtki.
- Reprezentativnost uzorka prema vrsti poslovanja tvrtki prikazana je na slici br. 3.2.



Slika. 3.2. Reprezentativnost uzorka prema poslovanju tvrtke

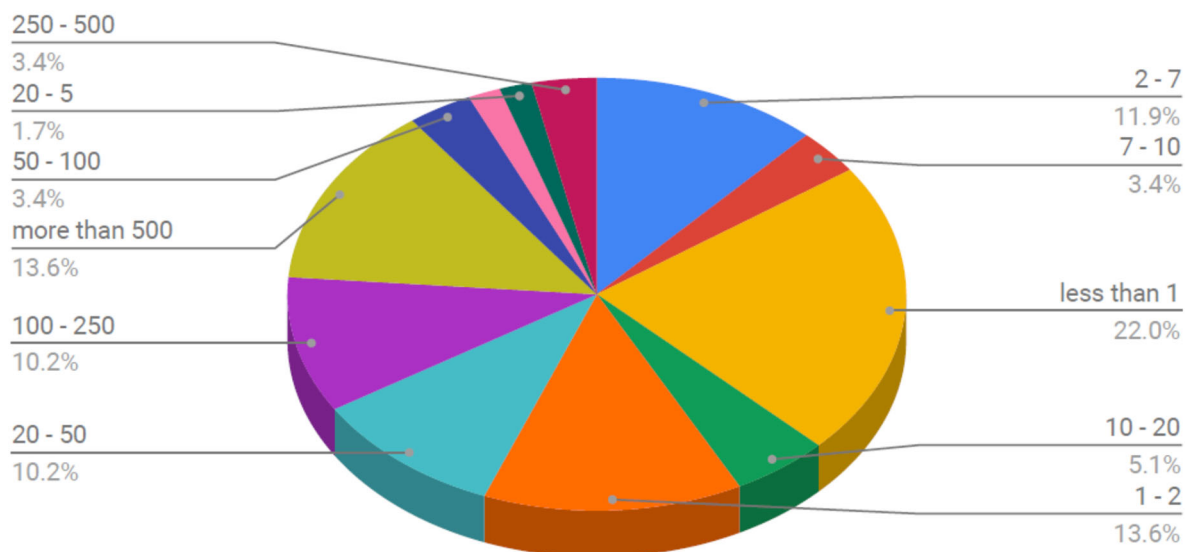
- Veličina tvrtke prema broju zaposlenika selektirana je na slijedeći način i prikazana je na slici br. 3.3.



Slika. 3.3. Raspodjela odgovora prema veličini tvrtke (broju zaposlenika)

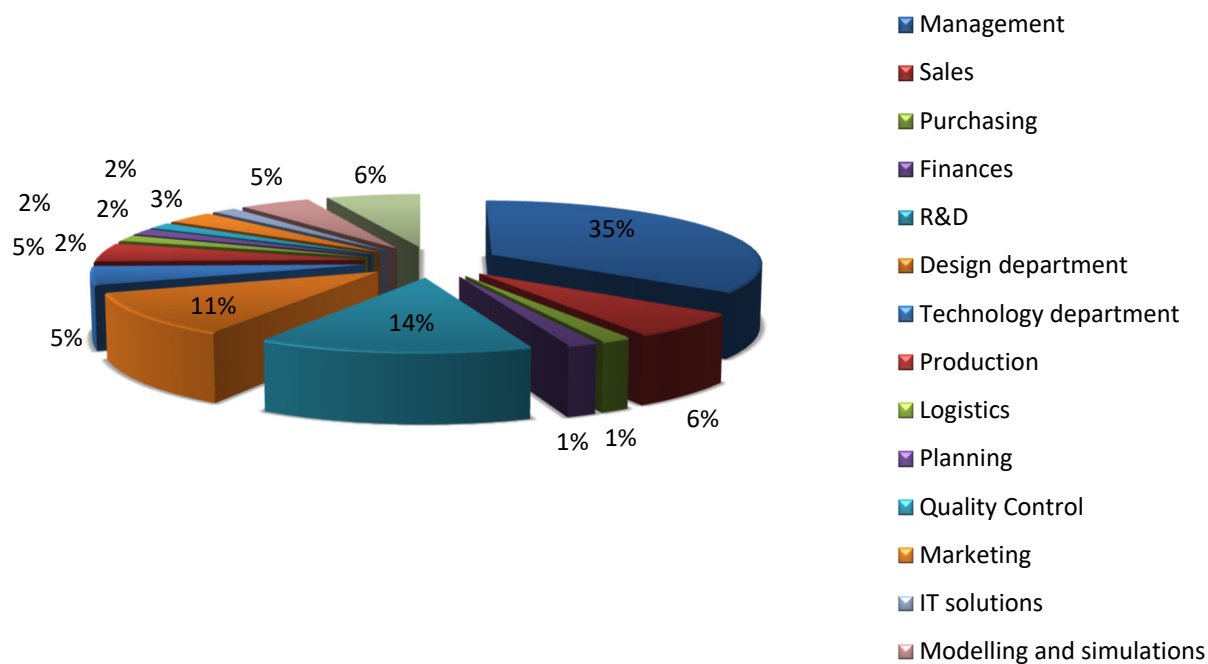
Anketirane mikro tvrtke uglavnom razvijaju projektna, softverska ili izradbena rješenja za velike tvrtke i prate trendove u industriji.

- Analiza uspješnosti tvrtki prema visini godišnjih prihoda prikazana je na slici 3.4.



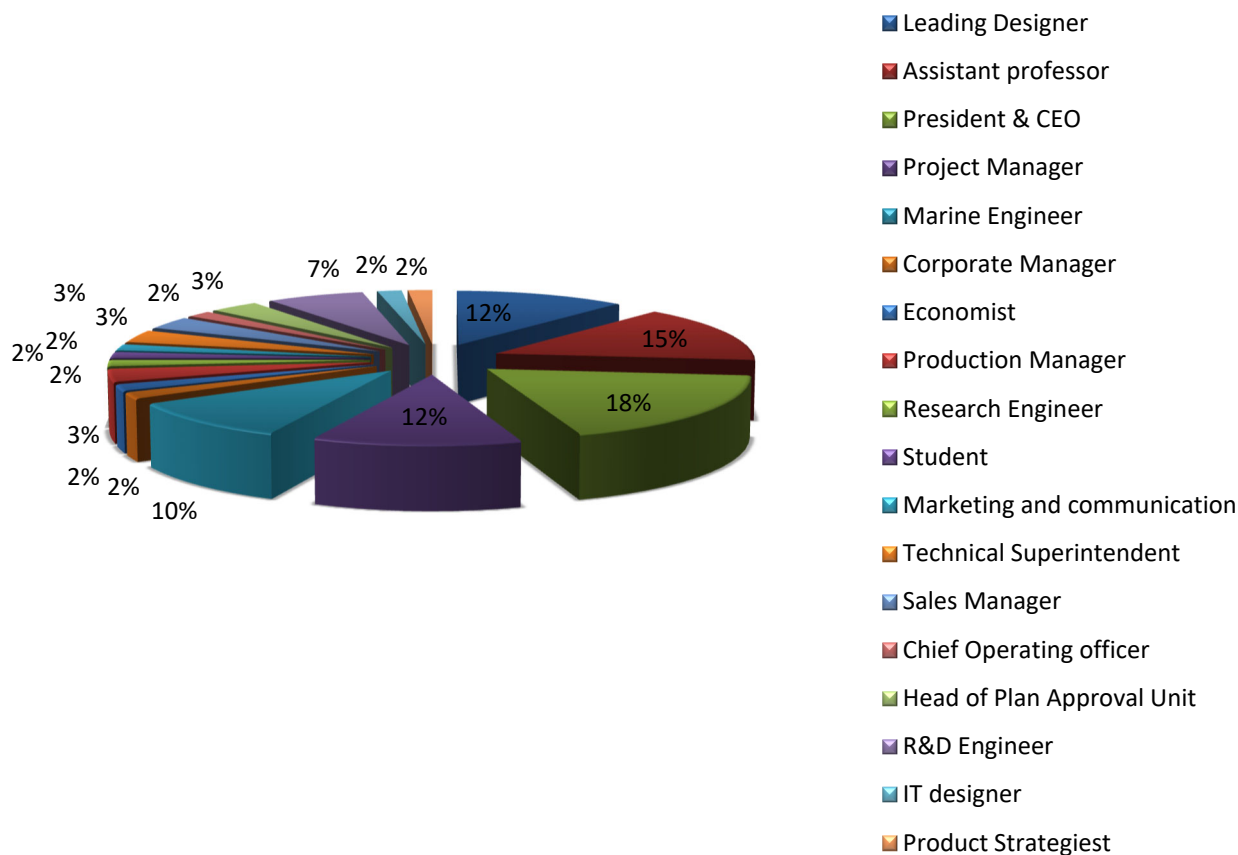
Slika. 3.4. Uspješnost tvrtke prema visini godišnjih prihoda izražena u milionima Eura

➤ Analiza ispitanika prema odjelu u tvrtki prikazana je na slici 3.5.



Slika. 3.5. Raspodjela ispitanika prema odjelu u tvrtki

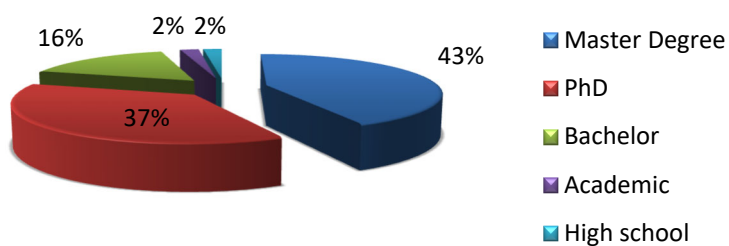
- Analiza ispitanika prema radnom mjestu u tvrtki prikazana je na slici 3.6.



Slika. 3.6. Raspodjela ispitanika prema radnom mjestu u tvrtki

Analizom prispjelih odgovora uočava se kvalitetan uzorak ispitanika i široka paleta stručnjaka koji su sudjelovali u anketi iz raznih sektora brodograđevnog sektora i različitih razina brodograđevne industrije.

- Analiza razine obrazovanja ispitanika prikazana je na slici 3.7.



Slika. 3.7. Raspodjela obrazovanosti ispitanika

3.6 Druga grupa pitanja rezultati – procjena sadašnjeg stanja

Druga grupa pitanja odnosi se na procjenu trenutnog stanja tvrtke kako bi se dobio uvid u korištenje tehnologija s obzirom na raspoloživu infrastrukturu i organizaciju unutar tvrtke, planiranje procesa i upravljanje procesima.

Ovdje su formirana pitanja na način da obrađuju razvoj proizvoda, planiranje, upravljanje procesima i proizvodnje, te povezanost i razmjenu informacija unutar tvrtke i izvan nje.

U prvoj skupini pitanja ponuđeni su odgovori s mogućnošću višestrukog odabira ili upisa vlastite kategorije. Druga skupina pitanja traži jedinstveni odgovor sa da ili ne, treća skupina pitanja nudi ocjenjivanje odabranih elemenata koncepta na ljestvici od 1 do 5, gdje je 1 najslabija ocjena dok je 5 najviša ocjena.

Prva skupina pitanja selektirana je na slijedeći način:

1. Odabrati odgovor koji najbolje opisuje razvoj proizvoda/rješenja u vašoj tvrtki,
2. Odabrati odgovor koji najbolje opisuje tehnologiju koja dominira u vašoj tvrtki,
3. Odabrati odgovor koji najbolje opisuje upravljanje i kontrolu poslovnih procesa i proizvoda/poslovnih rješenja,
4. Odabrati odgovor koji najbolje opisuje sustav kontrole kvalitete (*eng. Quality Control*) koja dominira u vašoj tvrtki,
5. Odabrati odgovor koji najbolje opisuje planiranje procesa (*eng. Process Planning*) u vašoj tvrtki,
6. Odabrati odgovor koji najbolje opisuje upravljanje životnim ciklusom proizvoda/poslovnog rješenja (*eng. Product Lifecycle Management-PLM*) u vašoj tvrtki,

Za svaki od navedenih pitanja ponuđeno je rangiranje odgovora/rješenja na način da predstavljaju određene tehničke karakteristike razine *Brodogradnja 1.0* do *4.0*. (Tablica 3.1) [79].

Za primjer se opisuje selekcija ponuđenih odgovora na pitanje br.2; Odabrati odgovor koji najbolje opisuje tehnologiju koja dominira u tvrtki.

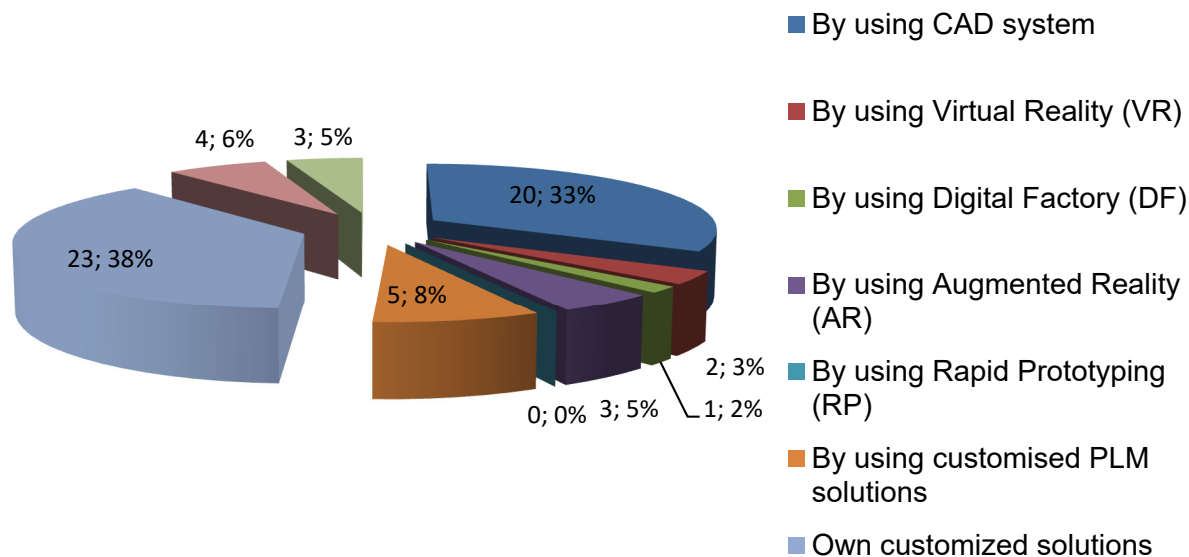
Ponuđeni su slijedeći odgovori:

- *Brodogradnja 1.0*: Ručna obrada, ručna montaža (ručni rad u radionicama),
- *Brodogradnja 2.0*: Automatizirana proizvodna linija (dio procesa), strojevi za izradu ili obradu,
- *Brodogradnja 3.0*: Moderni obradni centri, robotske stanice na automatiziranim linijama u radionicama ili procesu,
- *Brodogradnja 4.0*: Adaptivna samooptimizirajuća pametna tehnologija za pojedinačnu proizvodnju, senzoričani proizvodni proces/dio procesa, prediktivna analitika.

U Tablici br.3.1. posloženi su ponuđeni odgovori u upitniku u odnosu na industrijsku razinu procesa od *Brodogradnje 1.0* do *Brodogradnje 4.0*.

Rezultati analize podataka za odgovore na pitanja kako slijedi:

Rezultati 1a: Analiza razvoja proizvoda/poslovnih rješenja u tvrtki prikazana je na Slici 3.8.



Slika. 3.8. Raspodjela razvoja proizvoda /poslovnih rješenja u tvrtki

Tablica 3.1. Selekcija industrijskog razvoja u brodogradnji

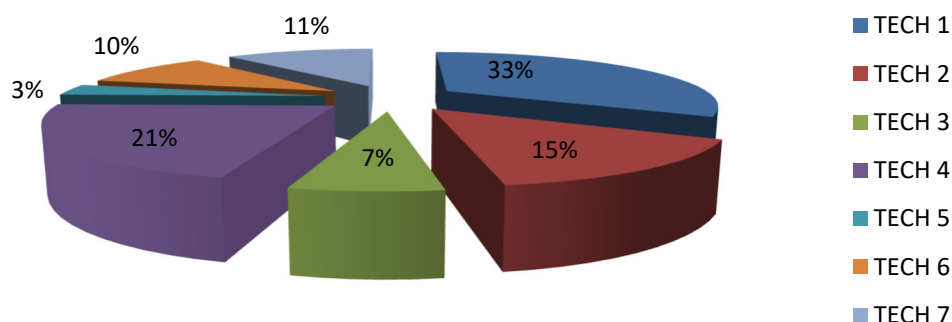
	Pitanje br.1	Pitanje br.2	Pitanje br.3	Pitanje br.4	Pitanje br.5	Pitanje br.6
Brodogradnja 1.0	Razvoj proizvoda pomoću CAD sustava	Ručna obrada ili ručna montaža	Usmena komunikacija čovjek-čovjek upravitelj direktno daje upute zaposleniku)	Kontrola proizvodnje na kraju proizvodnog procesa	Planiranje procesa se oslanja na iskustvo stručnjake tvrtke	Prisutna je podjela u funkcionalne odjele
Brodogradnja 2.0	Razvoj proizvoda pomoću CAD sustava	Automatizirana proizvodna linija ili strojevi za obradu	Pismena komunikacija čovjek-čovjek (upravitelj pismeno daje upute zaposleniku)	Međutaktna kontrola tijekom cjelokupnog procesa	Planiranje procesa se oslanja na iskustvo stručnjake tvrtke Planiranje konvencionalnim softverom za planiranje	Prisutna je podjela u funkcionalne odjele
Brodogradnja 3.0	Razvoj proizvoda pomoću simulacije i digitalne tvornice (DF)	Moderni obradni centri, robotske stanice na automatiziranim linijama	Komunikacija čovjek-stroj (radnik upravlja strojem u procesu ili proizvodnom linijom) Komunikacija M2M (machine to machine)	Kontrola kvalitete prema konceptu cjelovitog upravljanja kvalitetom (TQM) Kontrola kvalitete prema ISO	Planiranje se oslanja na specijalizirani softver za planiranje procesa	Odjeli organizirani putem računalne integrirane proizvodnje (eng. Computer Integrated Manufacturing-CIM)
Brodogradnja 4.0	Razvoj proizvoda pomoću virtualne stvarnosti (VR), proširene stvarnosti (AR), brze izrade prototipa (RP), PLM	Adaptivna pametna tehnologija za pojedinačnu proizvodnju, Senzorirani proizvodni proces, prediktivna analitika	Komunikacija putem intranet kolaborativne komunikacije	Kontrola kvalitete prema Six Sigma Pametna kontrola kvalitete (automatski prilagođen procesa samokontrola kvalitete)	Planiranje procesa pomoću softvera za planiranje resursa poduzeća (ERP-a) i strukturnoj dinamičkoj kontroli (SDC)	Odjeli organizirani putem planiranja resursa poduzeća (ERP i MES) Tvrtka integrirana u pametni oblak (Product Management Cloud)

Ocjenjivanja industrijske razine za razvoj proizvoda/poslovnih rješenja u brodograđevnoj industriji na temelju pristiglih odgovora prikazan je na Slici br. 3.9.



Slika. 3.9. Rangiranje razvoja proizvoda u tvrtki

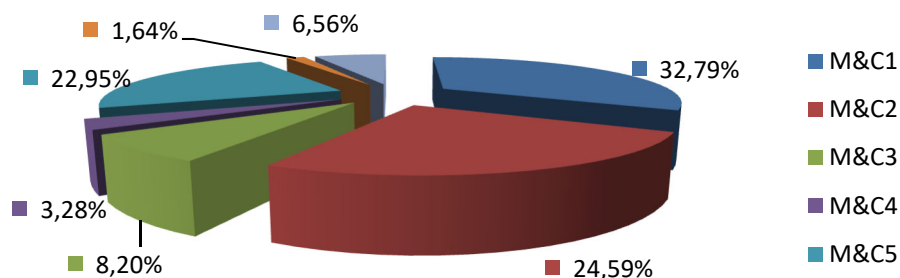
Rezultati 2a: Analiza tehnologije koja dominira u tvrtki prikazana je na Slici 3.10.



Slika. 3.10. Raspodjela odgovora prema tehnologiji koja dominira u tvrtki

Iz prikupljenih odgovora uočava se zastupljenost tehnologije ručne obrade ili ručne montaže (33%), dok je proizvodnih procesa opremljenih senzorima zastupljeno vrlo mali postotak (3%). Adaptivna i pametna individualizirana tehnologija zastupljena je s udjelom 21%.

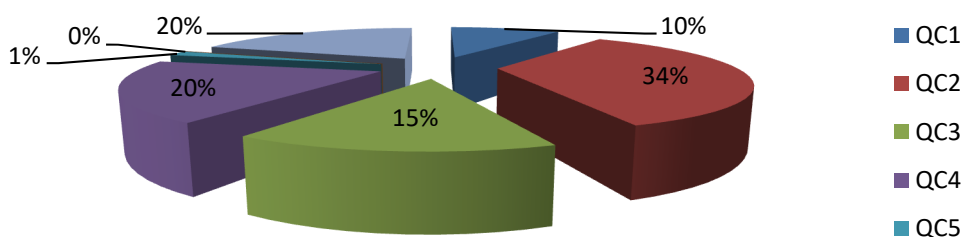
Rezultati 3a: Analiza upravljanja i kontrole poslovnog procesa koja dominira u tvrtki prikazana je na slici 3.11.



Slika. 3.11. Raspodjela odgovora prema upravljanju i kontroli procesa u tvrtki

Iz prikupljenih odgovora uočava se zastupljenost usmene komunikacije između uprave i zaposlenika (32,79%), pismena komunikacija uprave i zaposlenika (24,59%). Uočava se također, zastupljenost intranet kolaborativne komunikacije (22,95%).

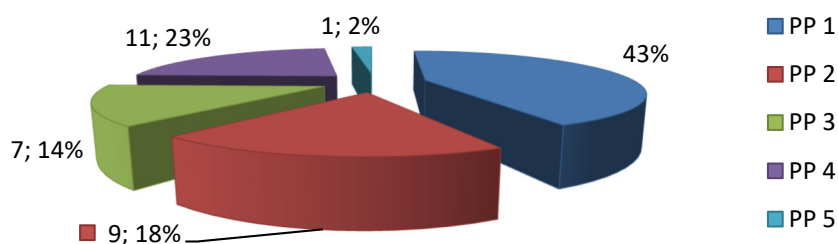
Rezultati 4a: Analiza procesa kontrole kvalitete koji dominira u tvrtki prikazana je na Slici 3.12.



Slika. 3.12. Raspodjela procesa kontrole kvalitete koji dominira u tvrtki

Iz prikupljenih odgovora uočava se zastupljenost međutaktne kontrole tijekom proizvodnog procesa (34%), dok je vrlo mali postotak pametnog upravljanja procesom (samokontrola procesa) (1%).

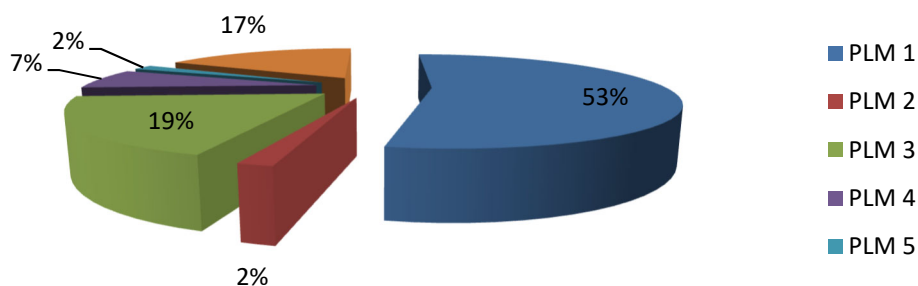
Rezultati 5a: Analiza planiranja procesa koja dominira u tvrtki prikazana je na slici 3.13.



Slika. 3.13. Raspodjela planiranja procesa koja dominira u tvrtki

Iz prikupljenih odgovora uočava se izrazita zastupljenost planiranja metodama utemeljenim na iskustvu stručnjaka za planiranje unutar tvrtki (43%), dok je vrlo mali postotak zastupljenosti pametnog dinamičkog planiranja procesa (1,2%).

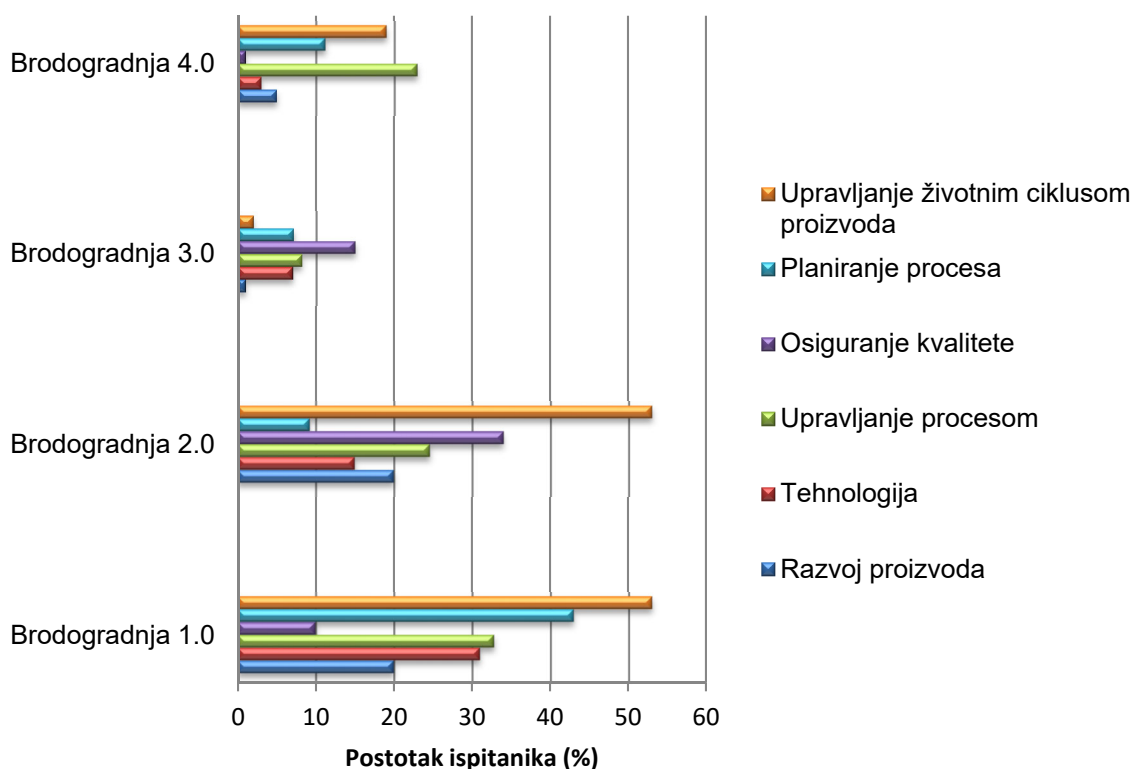
Rezultati 6a: Analiza upravljanjem životnim ciklusom proizvoda koja dominira u tvrtki prikazana je na Slici 3.14.



Slika. 3.14. Raspodjela upravljanja životnim ciklusom proizvoda u tvrtki

Iz prikupljenih odgovora uočava se izrazita zastupljenost organiziranosti tvrtki u odjele prema funkcijama (53%), uočava se i organiziranost putem *ERP* ili *MES* sistema (17%), dok je integracija u oblaku znatno manje zastupljena (7%).

Na temelju podataka iz prikupljenih odgovora prethodno priloženih u ovom poglavlju i tablice br. 3.1. izrađen je dijagram podjele tvrtki prema razinama industrijske proizvodnje od *Brodogradnja 1.0* do *Brodogradnja 4.0*, prikazan na slici br. 3.15.



Slika. 3.15. Raspodjela tvrtki prema razini industrijskog razvoja

Iz priložene raspodjele uočava se da su tvrtke ispitanika uglavnom smještene u području između *Brodogradnja 2.0* i *Brodogradnja 3.0*. Uočava se i prisutnost visoke industrijske razine u segmentu upravljanja procesima i upravljanja životnim ciklusom proizvoda (*Brodogradnja 3.6*). Može se konstatirati prosječna industrijska zrelost analiziranih tvrtki od **2.80**.

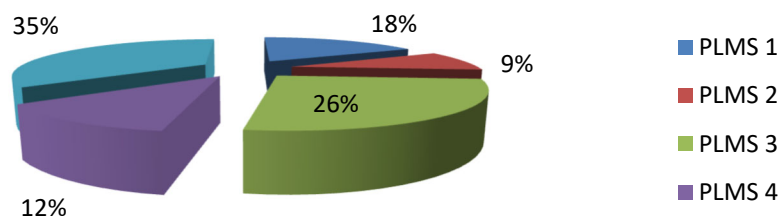
3.7. Analiza tehnike, zaposlenika i organizacije

U direktnom kontaktu s ispitanicima razmatran je i segment zrelosti kompanija za promjene koje donose tehnologije 4.0. Ispitanici su trebali posebno razmotriti i ostale segmente koncepta, posebno njegov utjecaj na buduće radno okruženje zaposlenika.

Prema paradigmi nove industrijske revolucije, vrlo važni elementi su primjena IT tehnologija, stručni zaposlenici, efikasna organizacija i prilagodba tehnike [4].

3.7.1. Analiza tehnike

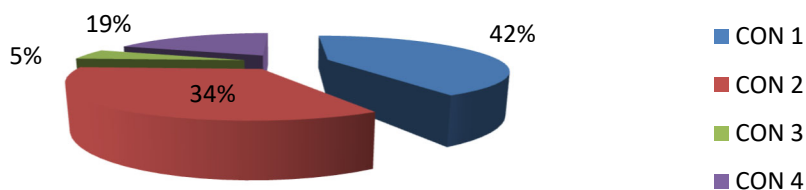
Rezultati 7a: Analiza primjene softverskih rješenja za upravljanje životnim ciklusom proizvoda (*eng. PLM*) koja dominira u tvrtki prikazana je na slici 3.16.



Slika. 3.16. Raspodjela primjene softverskih rješenja u tvrtkama

Iz prikupljenih odgovora uočava se relativno loše korištenje ERP (*eng. Enterprise Resources Planning*) i PLM (*eng. Products Lifecycle Management*) sustava (26%). Uočava se djelomična neupućenost ispitanika u softverska rješenja koja koristi tvrtka (35%). ERP i PLM softverska rješenja trebaju biti temelj promjena, no direktnom pismenom komunikacijom s ispitanicima uočava se nepostojanje sustavnog upravljanja materijalom i informacijama.

Rezultati 8a: Analiza važnosti vertikalne integracije između menadžmenta i zaposlenika prikazana je na slici 3.17.

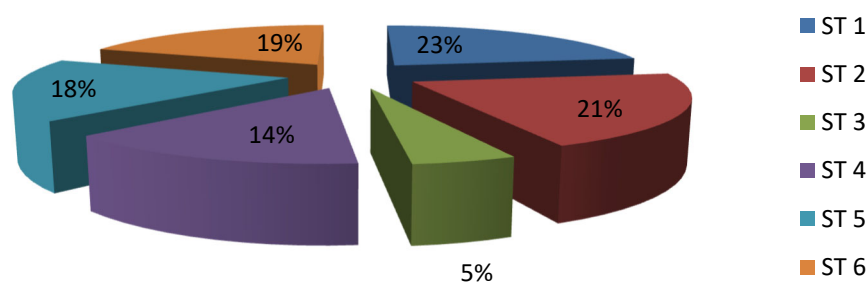


Slika. 3.17. Raspodjela važnosti vertikalne integracije u tvrtkama

Iz prikupljenih odgovora uočava se da se tvrtke oslanjaju na uhodane procese razmjene informacija i podataka (34%); uočava se važnost i svjesnost velikog broja ispitanika o potrebi snažne sustavne vertikalne integracije u tvrtki na svim razinama i u svim segmentima poslovnog procesa.

3.7.2. Analiza zaposlenika

Rezultati 9a: Analiza važnosti kvalificiranih zaposlenika u okruženju implementacije koncepta *Brodogradnja 4.0* prikazana je na Slici 3.18.

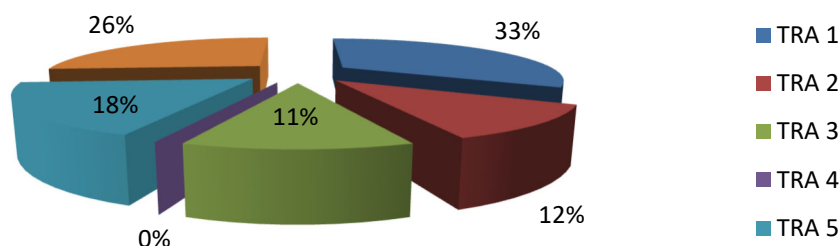


Slika. 3.18. Raspodjela tvrtki prema razini stručnosti zaposlenika

Uočava se izrazita zastupljenost potrebe podizanja stručnosti postojećih zaposlenika koji trebaju biti nositelji promjena u digitalizaciji tvrtke (23%) u tehničkim znanjima kao i u IT-u. Kako je najviše odgovora pristiglo od članova uprave, uočava se i procjena da su stručni zaposlenici središte promjena prema *Brodogradnji 4.0* (18%).

3.7.3. Analiza organizacije

Rezultati 10a: Analiza tehnoloških rješenja sljedivosti u tvrtki prikazana je na slici 3.19.



Slika. 3.19. Raspodjela tehnoloških rješenja za sljedivost poslovnih procesa

Iz prikupljenih odgovora uočava se izrazita zastupljenost konvencionalnog praćenja proizvodnje/poslovnih rješenja putem voditelja procesa (33%). Može se konstatirati zrelost brodograđevnih tvrtki u segmentu sljedivosti proizvoda/poslovnih rješenja na razini *Brodogradnje 2.8*.

3.7.4. Analiza rezultata primjene naprednih tehnologija

Rezultati 11a: Analiza primjene elemenata *Brodogradnje 4.0* već implementiranih unutar tvrtke.

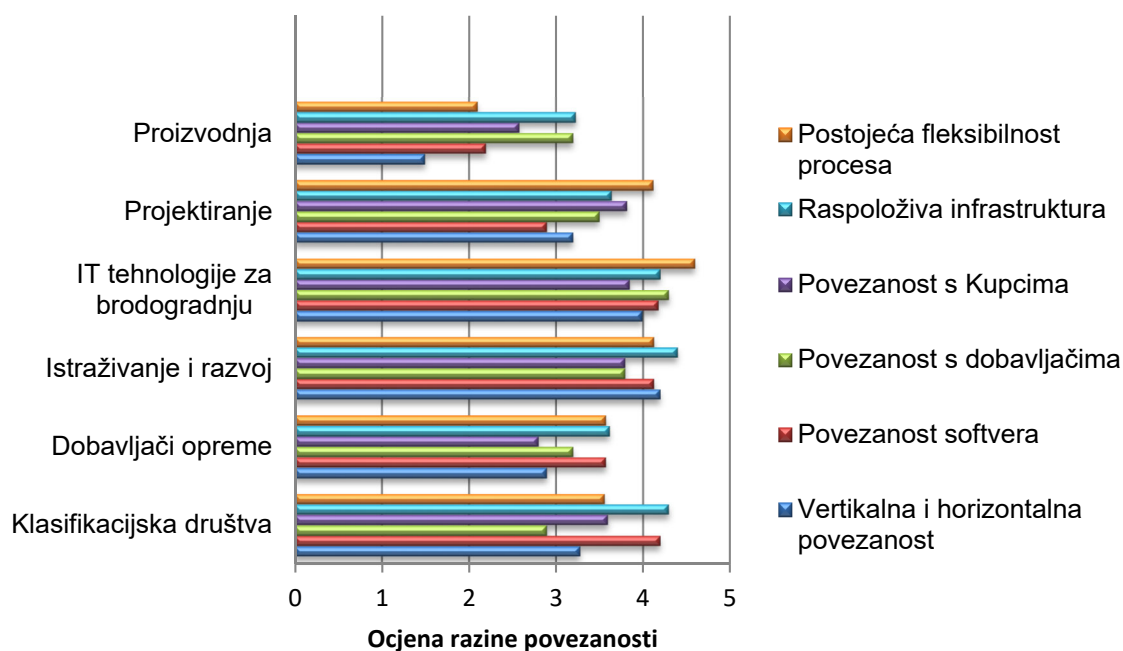
Ispitanici su s visokim postotkom (75%) sa DA, ocijenili postojanje primjene nekog od elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* u tvrtki. 25% ispitanika ne uočava primjenu nekih od segmenata prema *Brodogradnji 4.0*.

Ispitanici su također postotkom od 53% ocijenili postojanje sustavnih aktivnosti planiranja implementacije koncepta *Brodogradnja 4.0*, dok je 47% odgovorilo da ne uočava strateške aktivnosti prema implementaciji koncepta. Uočava se da postoji primjena nekih od elemenata koncepta no nedostaje sustavnih strateških aktivnosti unutar tvrtke prema implementaciji koncepta.

3.7.5. Analiza raspoloživih resursa

Kako bi se omogućila primjena elemenata koncepta nužni preduvjeti su visoka kvaliteta internetske infrastrukture, formiranje velike baze podataka, djelomična rekonstrukcija resursa tvrtke te stručni zaposlenici. Ispitanici su zamoljeni da iznesu svoje mišljenje o funkcioniranju trenutne internetske infrastrukture u tvrtki, suradnju sa dobavljačima i potencijalnim kupcima, kao i korištenje i funkcionalnost računalnih resursa. Ispitanicima je ponuđena mogućnost odabira ocjene na ljestvici od 1 (niska razina) do 5 (visoka razina).

Rezultati 12a: Cjelovita analiza razine vertikalne i horizontalne integracije unutar tvrtke, povezanosti softvera, povezanosti s dobavljačima, s kupcima, razina povezanosti infrastrukture te ocjena fleksibilnosti procesa, prikazana je na slici 3.20.



Slika. 3.20. Razina integracije najvažnijih segmenata procesa

Rezultati pokazuju da je u skupini tvrtki iz segmenta brodograđevne proizvodnje postojeća fleksibilnost procesa ocijenjenja (2,15), raspoloživa infrastruktura (3,25), povezanost s Kupcima i dobavljačima opreme (3,15) dok je povezanost softvera te horizontalna i vertikalna povezanost ocijenjena ocjenom (1,58).

Uočeno je kako visoko obrazovani ispitanici zaposleni u tvrtkama s intelektualnim uslugama vezanim uz brodogradnju imaju visoku percepciju prema fleksibilnosti i povezanosti unutar kompanije kao i vanjskim poslovnim partnerima.

3.8 Sažetak rezultata prvog dijela ankete

- 1) Dobna struktura ispitanika u prosjeku je između 40 i 55 godina. Ispitanici mahom smatraju da njihove tvrtke vode računa o dovođenju mladih visokoobrazovanih zaposlenika od kojih očekuju brzo uključenje u proces i prihvaćanje promjena koje se pripremaju nastupiti.
- 2) Uočava se izrazito visok postotak visoko obrazovanih stručnjaka. Uglavnom je riječ o članovima akademske zajednice, klasifikacijskim društvima te istraživačkim tvrtkama koje izrađuju poslovna i proizvodna rješenja za druge, poglavito vrlo velike brodograđevne tvrtke.
- 3) Ispitanici su ocjenjivali razne segmente brodograđevnog procesa, te je analizom

razine digitalizacije, razmjene podataka, prikupljanja podataka, obrade i primjene rezultata iz prikupljenih podataka u tvrtkama, ocijenjeno da je trenutna razina industrijske zrelosti brodograđevnog sektora na razini *Brodogradnja 2.8*.

- 4) Iz prikupljenih odgovora uočava se nedostatak organiziranog informiranja stručnjaka o promjenama koje će nastupiti u budućnosti, informiranost o mogućnostima i napretku koje donose promjene s tehnologijama 4.0 ostavljena je na samoinicijativnu informiranost zaposlenika.

Na kraju rada nalazi se Privitak br.1 anketnog upitnika.

3.9 Smjernice prema *Brodogradnji 4.0*

Treća grupa pitanja upućena ispitanicima odnosi se na rangiranje smjernica prema *Brodogradnji 4.0* prema važnosti, gdje su ispitanici zamoljeni da iznesu svoj stručni stav o implementaciji odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, na način da se ponuđeni elementi koncepta poredaju prema prioritetima, gdje su na prvo mjesto trebali staviti elemente za koje drže da su najvažniji za implementaciju dok se na posljednje mjesto stavlja element koncepta koji drže najmanje važnim (najmanje utjecajnim) za proces implementacije koncepta *Brodogradnja 4.0*.

Radi jasnije prezentacije grafova u nastavku, elementi su opisani skraćenicama definiranim u zagradama slijedom kako je navedeno:

- Internet stvari (*eng. Internet of Things, IOT*),
- Kibernetско - fizički sustavi (*eng. Cyber-Physical Systems, CPS*)
- Digitalni blizanac (*eng. Digital Twin, DT*),
- Kibernetска sigurnost (*eng. Cyber Security, CS*),
- Velika baza podataka (*eng. Big Data, BD*),
- Virtualna i proširena stvarnost (*eng. Augmented Reality/Virtual Reality, AR/VR*),
- Aditivna proizvodnja (*eng. Additive manufacturing, AM*),
- Autonomni transport (*eng. Autonomous Vehicles, AVS*),
- Modeliranje i simuliranje proizvoda i procesa (*eng. Modelling & Simulation of Production Processes, MSP*),
- Robotska automatizacija procesa (*eng. Robotic Process Automation, RPA*),
- Fleksibilnost proizvodnog procesa (*eng. Production Process Flexibility, PPF*),

- Pametno napredno planiranje u vremenu (*eng. Smart Real Time Planning, SRP*);
- Automatizacija i robotizacija procesa skladištenja (*eng. Warehouse Automatization and Robotization, WAR*),
- Progresivno RFID povezivanje (*eng. Progressive RFID interconnectivity, PI*),
- Rad u sigurnom oblaku (*eng. Cloud Computing, CC*),
- Prediktivno održavanje (*eng. Predictive Maintenance, PM*),
- Prediktivna analitika (*eng. Predictive Analytics, PA*),
- Podrška donošenju odluka (*eng. Decision Making Support, DMS*),
- Sustav samooptimizacije (*eng. Self-Optimization Systems, SS*),
- Integrirana nabava (*eng. Integrated Supply Chain, ISC*)

Anketni upitnika ovog dijela istraživanja naveden je u Privitku br.2 na kraju ovog rada.

U ovom dijelu ankete ispitanici su također zamoljeni da daju svoj stručni stav kako bi implementacija odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* digitalnih tehnologija pomogla njihovoj kompaniji:

- Ispitanici su ponudili odgovore na slijedeći način:
 - Produktivnost bi značajno porasla (14%),
 - Proizvodne i procesne greške bi se smanjile (20%),
 - Kontrola proizvodnog procesa bi značajno porasla (19%),
 - Planiranje i kontrola procesa bile bi značajno točnije (18%),
 - Nadzor procesnih aktivnosti bio bi točniji (29%)
- Ispitanici su zamoljeni da potvrde da li je u njihovoj tvrtki već započela primjena nekog od elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, odnosno aktivnosti na implementaciji koncepta; 25% je odgovorilo negativno dok je 75% odgovorilo pozitivno.
- Istim postotkom su ispitanici odgovorili na pitanje da li su im poznate neke aktivnosti koje provodi tvrtka kako bi se pripremila za implementaciju koncepta; 25% odgovorilo je negativno, dok je 75% odgovorilo potvrdno.

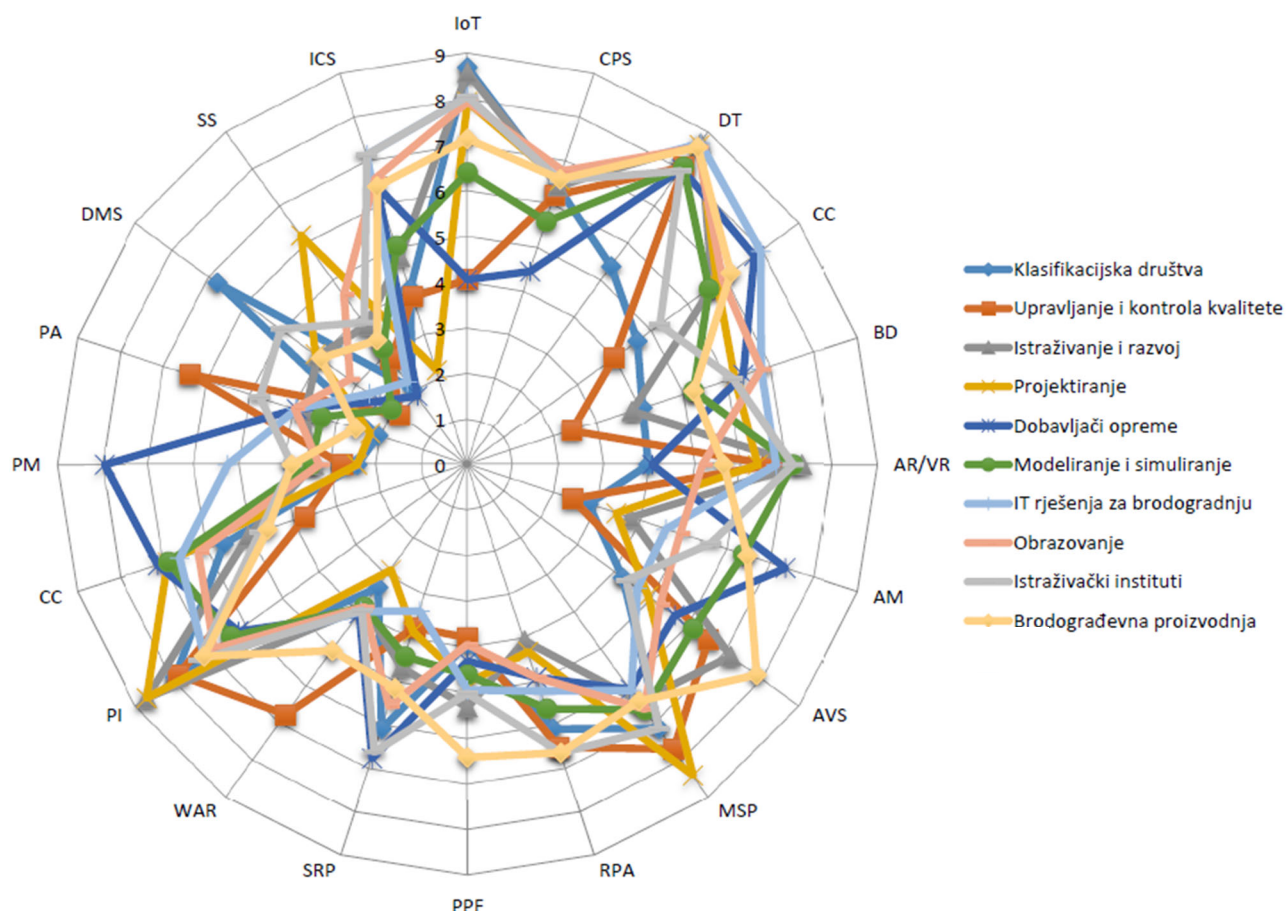
Može se konstatirati da je većina tvrtki svjesna promjena koje dolaze i ozbiljno razmatraju način kako s obzirom na raspoložive resurse započeti s implementacijskim procesom, te kako procesuirati metodologiju implementacijskog procesa.

3.10. Analiza odabira elemenata koncepta

U ovom dijelu istraživanja ispitanici su zamoljeni da formiraju ljestvicu redoslijeda implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* te je za istraživanje odabrana skupina ispitanika zaposlenih u specijaliziranim tvrtkama za koje je procijenjeno da su glavni nosioci budućeg implementacijskog procesa.

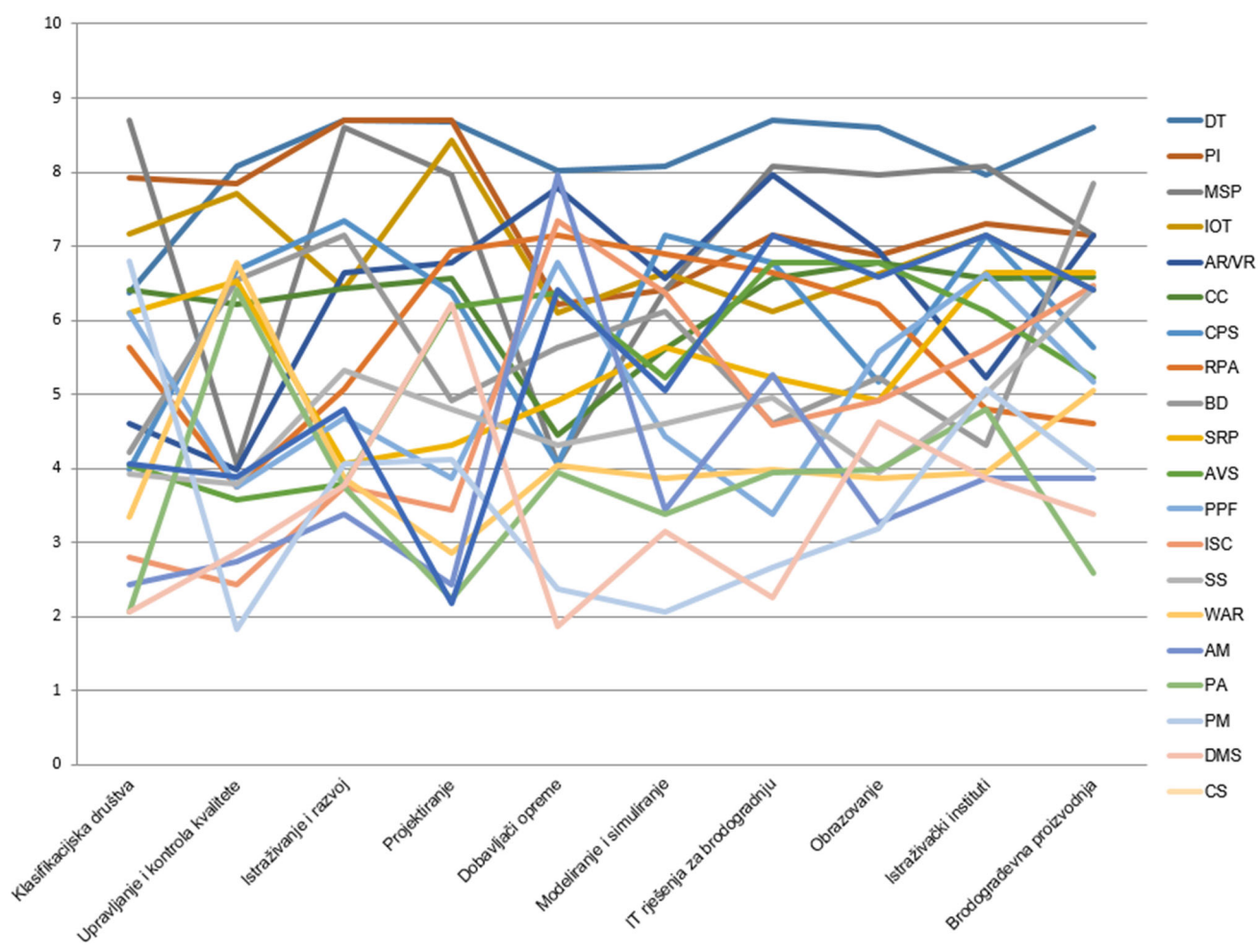
Analizira se implementacijski proces na primjeru brodogradilišta čiji je industrijski razvoj na razini Brodogradnja 2.8.

Rezultat 1b: Analiza elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* poredani prema prioritetima za implementaciju, gdje se na prvo mjesto stavlja najutjecajnije 9 (najvažnije) s kojim treba započeti implementacijski proces, dok se na zadnje mjesto stavlja najmanje utjecajan 1 (najmanje važan), smatra se da može nastupiti u nešto kasnijoj fazi procesa implementacije, prikazani su na slici 3.21. Zbog preglednosti grafičkog prikaza dodijeljen im je naziv u vidu skraćenice kako je opisano u prethodnom poglavlju.



Slika. 3.21. Ljestvica elemenata koncepta prema prioritetima za implementaciju

Rezultat 2b: Analiza je obradila ispitanike prema djelatnostima kojima se pojedina tvrtka bavi. Najviši prioritet, element koncepta s kojim treba započeti implementacijski proces pokazala se implementacija digitalnog blizanca (*eng. Digital Twin, DT*), potom slijedi progresivno senzoriiranje (*eng. Progressive sensing & RFID interconnectivity, PI*) pa nadalje kako je dodatno pojašnjeno dijagramom na slici 3.22.



Slika. 3.22. Ljestvica važnosti odabranih elemenata koncepta

Skupina ispitanika s obzirom na djelatnosti; istraživačka skupina tvrtki poput klasifikacijskih društava, istraživačkih instituta i sl., najveći prioritet daju implementaciji interneta stvari (eng. *Internet of Things, IoT*) dok su tvrtke koje proizvode, proizvode za brodogradnju, poput dobavljača opreme i skupina brodograđevna proizvodnja prioritet dali implementaciji koncepta digitalni blizanac (eng. *Digital Twin, DT*). Najniža razina važnosti dodijeljena je skupini kibernetika sigurnost (eng. *Cyber Security, CS*) i upravljanje i kontrola kvalitete primjenom podrške donošenju odluka (eng. *Decision Making Support, DMS*); dok je u skupini upravljanje i kontrola kvalitete najniža ocjena dana implementaciji sustava samooptimizacije (eng. *Self-Optimization Systems, SS*). Skupina ispitanika iz sektora obrazovanja najnižu važnost dana je prediktivnom održavanju (eng. *Predictive Maintenance, PM*).

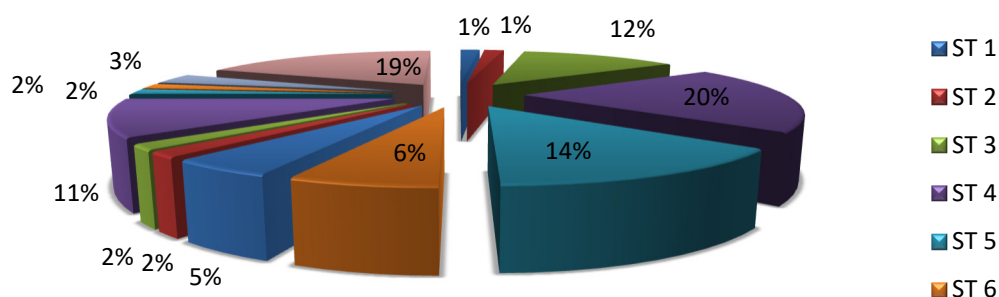
Značajne razlike u rangiranju pojedinih elemenata koncepta između skupina nisu uočene.

3.11. Analiza prioriteta odabranih elemenata koncepta za primjenu u brodogradilištu

Nadalje, ispitanici su zamoljeni da daju procjenu redoslijeda implementacije elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* u odabranom brodogradilištu srednje veličine, prema najutjecajnijem (onaj s čijom implementacijom bi trebalo prvo započeti), prema onima koji su manje utjecajni (njihova primjena može doći nadalje u slijedećim fazama).

Razmatra se prioritet implementacije prema pojedinim odjelima u brodogradilištu.

Rezultat 3b: Analiza redoslijeda početka implementacije koncepta *Brodogradnja 4.0* u brodogradilištu srednje veličine prema odjelima prikazana je na slici 3.23.



Slika. 3.23. Početak implementacije konceptu *Brodogradnja 4.0* u brodogradilištu

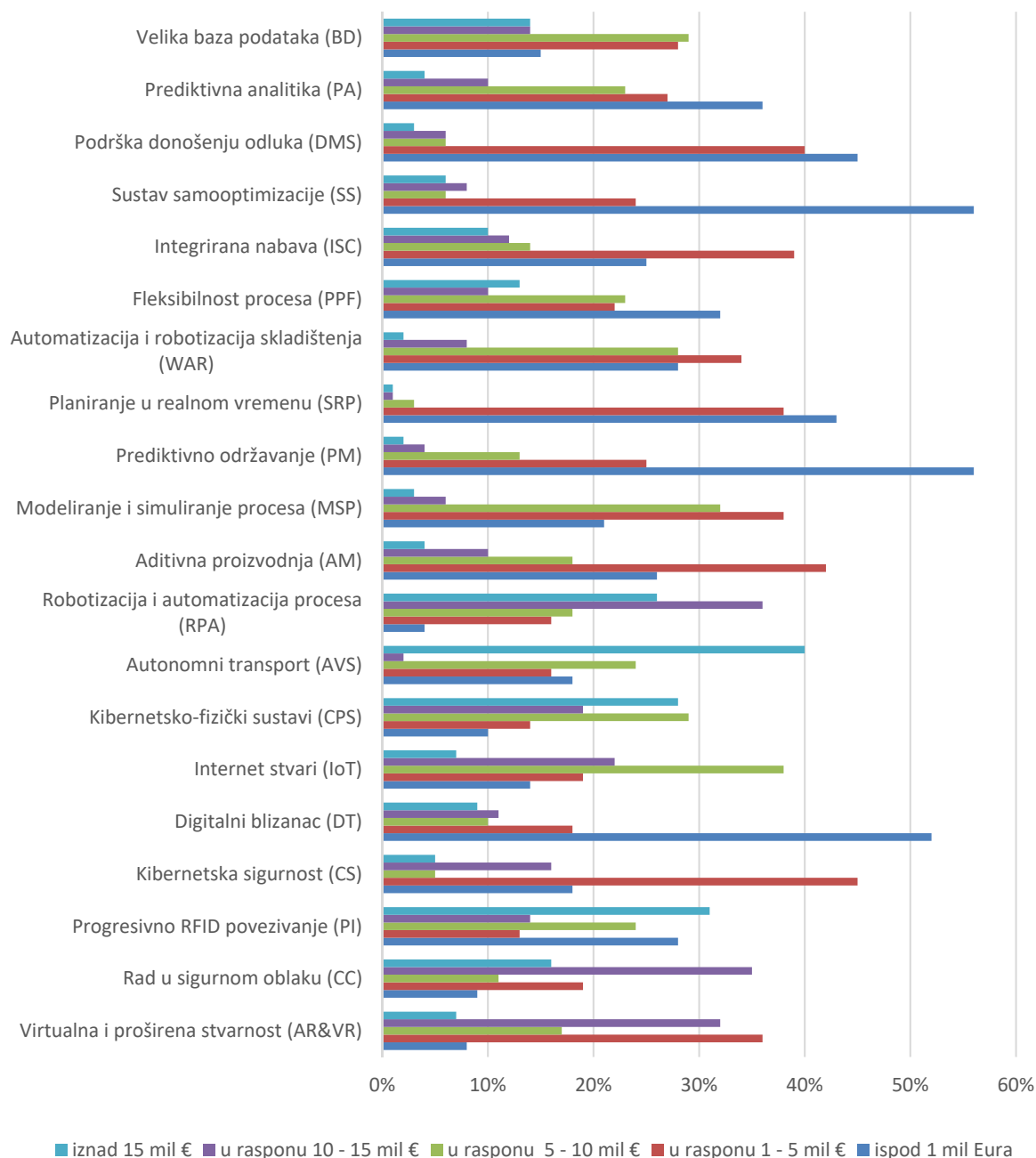
Iz prikupljenih odgovora ispitanika uočava se da su nositelji promjena Uprava (11%), segment projektiranja (20%) te segment istraživanja i razvoja (12%).

Neizostavno je potvrđeno da je učinak promjena snažniji ukoliko se započne s implementacijom tehnologija 4.0 u nekoliko odabranih ciljanih segmenata brodograđevnog procesa.

3.12. Analiza procjene investicijskih troškova za implementaciju koncepta

U ovom dijelu istraživanja ispitanici su zamoljeni da daju procjenu investicijskih troškova za implementaciju pojedinih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, u odabranom brodogradilištu srednje veličine, čiji je industrijski razvoj na razini *Brodogradnja 2.8*. Procjena investicije podijeljena je u pet skupina: od manje od 1 mil €, potom skupina od 1 do 5 mil €, nadalje skupina od 5 do 10 mil €. Kao najviša investicijska skupina ona je sa investicijama preko 15 min €.

Rezultat 4b: Analiza procjene investicijskih troškova za implementaciju odabrani elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* u brodogradilištu srednje veličine prikazana je na slici 3.24.



Slika. 3.24. Procjena investicijskog troška za implementaciju

Prema procjeni, ispitanici ocjenjuju da je najveći trošak investicije (preko 15 mil. €) implementacija *progresivno RFID povezivanje* u proizvodnom procesu (eng. *Progressive RFID inteconnectivity, PI*), potom *automatizacija i robotizacija*

proizvodnog procesa (eng. *Robotic Process Automation, RPA*), te implementacija *autonomnog transporta* (eng. *Autonomous Vehicles, AVS*), (raspon troška 10 – 15 mil. €).

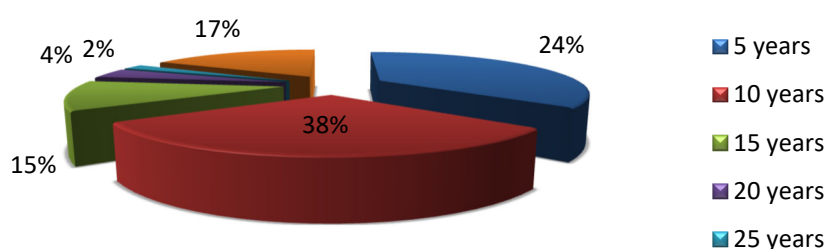
U srednju skupinu utroška (raspon 5 – 10 mil. €) ispitanici drže investiciju u *aditivnu proizvodnju* (eng. *Additive manufacturing, AM*), potom *internet stvari* (eng. *Internet of Things, IOT*), te *automatizaciju i robotizaciju skladištenja* (eng. *Warehouse Automatization and Robotization, WAR*).

U skupinu investicije u rasponu (1 – 5 mil. €) procijenjen je trošak implementacije *virtualne i proširene stvarnosti* (eng. *Augmented Reality/Virtual Reality, AR/VR*), potom *kibernetike sigurnosti* (eng. *Cyber Security, CS*) te *integrirana nabava* (eng. *Integrated Supply Chain, ISC*).

Procijenjena vrijednost troška ispod 1 mil € dana je za segmente implementacije *planiranja u realnom vremenu* (eng. *Smart Real Time Planning, SRP*), *prediktivne analitike* (eng. *Predictive Analytics, PA*) i *digitalnog blizanca* (eng. *Digital Twin, DT*). Posljednja skupina troškova procjenjuje investicije samo u specijalizirane softvere.

3.13. Analiza vremenskog perioda za implementaciju

Rezultat 5b: Analiza procjene vremenskog perioda implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* u odabranom brodogradilištu srednje veličine prikazana je na slici 3.25.



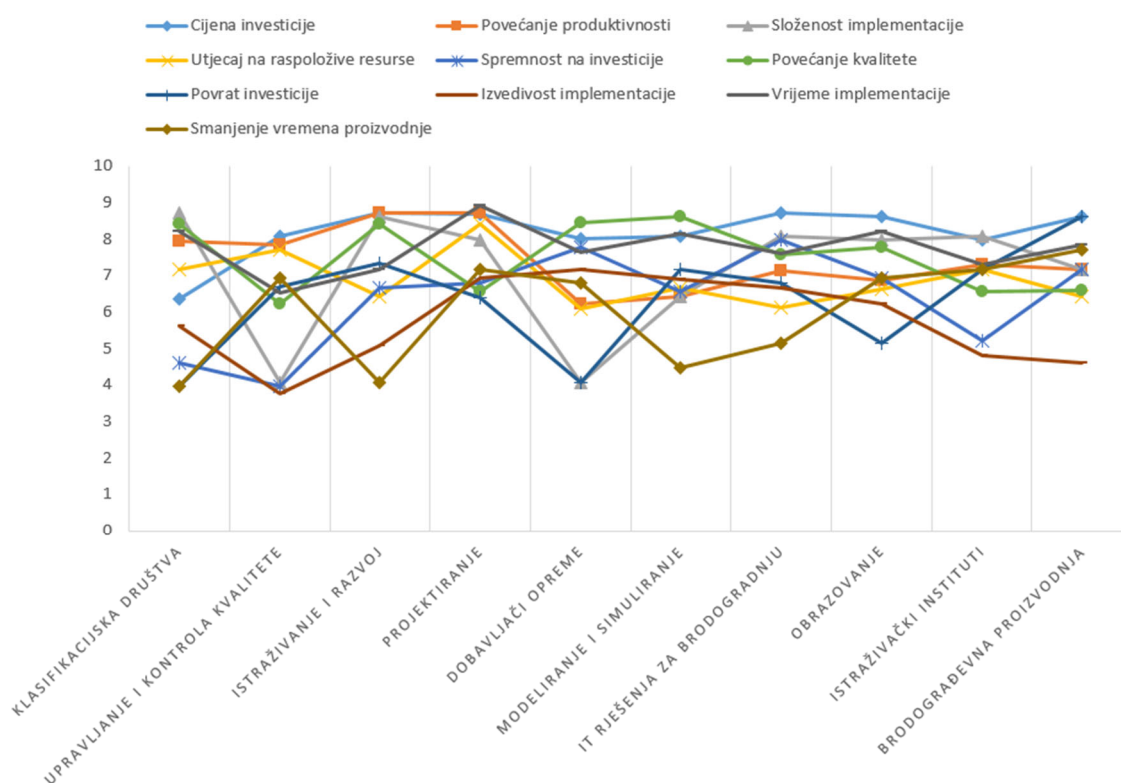
Slika. 3.25. Procjena vremenskog perioda za implementaciju koncepta

Iz prikupljenih odgovora je vidljivo da se u slijedećih 5 (24%) do 10 (38%) godina, očekuje snažni napredak u primjenama tehnologija koncepta *Brodogradnja 4.0*. Može se konstatirati da se promjene događaju i brže od očekivanog.

3.14. Analiza odabira glavnih kriterija za implementaciju

Ispitanici su zamoljeni da prema svojoj stručnoj procjeni i saznanjima iz prakse, daju usporedbu glavnih odabranih kriterija (ograničenja) koje drže da su najutjecajniji (najvažniji) u razmatranju odabira redoslijeda implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* u odabranom brodogradilištu. Od ispitanika se tražilo da ih poslože prema prioritetima od najutjecajnijeg (najvažnijeg) do najmanje utjecajnog.

Rezultat 6b: Analiza usporedbe glavnih odabranih kriterija (ograničenja) koje treba razmatrati prilikom uvođenja odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, gdje se na prvo mjesto stavlja najutjecajniji (najvažniji) kriterij (ograničenje) dok se na posljednje mjesto stavlja najmanje utjecajan (najmanje važan) kriterij (ograničenje) prikazani slici 3.26.



Slika. 3.26. Usporedba glavnih kriterija za implementacije koncepta

Rezultati pokazuju da su ispitanici rangirali kriterije (prema utjecaju) koje treba uzeti u obzir prilikom vrednovanja implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, na slijedeći način: *cijene investicije*, slijedi *povećanje*

produktivnosti, potom povećanje kvalitete, vremenski period implementacije te složenost implementacije.

Kao posljednji dio ankete ispitanici su zamoljeni usporediti odabrane kriterije međusobno, te nadalje i vrednovati odabrane elemente koncepta prema svakom od pet odabranih kriterija.

U privitku br.3 na kraju rada, prikazani su rezultati usporedbe kriterija međusobno kao i odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* prema svakom od odabranih pet kriterija.

3.15. Smjernice za početak procesa implementacije koncepta

Slijedom istraživanja provedenog anketom i u direktnom kontaktu s ispitanicima u tablici 3.2 formirana je lista odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* i predstavljeni procijenjeni preduvjeti za njihovu implementaciju.

Tablica 3.2 Preduvjeti za implementaciju koncepta *Brodogradnja 4.0*

Red. Br.	Element koncepta <i>Brodogradnja 4.0</i>	Implementacijski cilj	Nužni preduvjeti
1	Fleksibilnost procesa	Omogućiti brze izmjene u procesu uz znatno povećanje produktivnosti	Prilagodba postojećih resursa za brze izmjene u procesu
2	Senzorirani proces	Sve komponente resursa označene s računalnim segmentima za praćenje kretanja	Velika brzina prijenosa signala i velika brzina obrade podataka
3	Robotizacija i automatizacija proizvodnih linija	Potpuna automatizacija i robotizacija procesa	Fokusiranje na automatizirani tehnološki slijed uz smanjenje grešaka u proizvodnji
4	Velika baza podataka	Prikupljanje velike količine podataka o svakom segmentu procesa i proizvoda	Omogućiti snažan softver radi prikupljanja i pohrane velike količine podataka
5	Kibernetika sigurnost	Slobodno korištenje velike količine povjerljivih podataka i razmjena s dobavljačima	Visoka razina sigurnosti računalnih programa koji se koriste
6	Simulacija i modeliranje proizvoda i procesa	Mogućnost simulacije i modeliranja svakog dijela procesa	Prilagodba računalnih programa za primjenu u projektu kao i u proizvodnji
7	Progresivno senzoriranje procesa	Mogućnost nadzora svakog dijela procesa	Računalno podržani programi za povezivanje i senzoriranje procesa

8	Digitalni bliznac	Izrada digitalnog modela iz postojeće baze podataka	Mogućnost predviđanja svih komponenti opreme proizvoda i procesa
9	Internet stvari	U sve komponente ugrađeni sustavi s mogućnošću međusobne komunikacije i samoprilagođavanja	Velika baza podataka, prijenos podataka i mogućnost međusobne komunikacije
10	Rad u oblaku	Internetski procesi koji omogućuju rad i spremanje podataka u oblaku	Moguće ostvariti tek nakon uspostavljanja snažne internetske infrastrukture
11	Monitoring proizvodnog procesa	Nazor i praćenje svih resursa u proizvodnom procesu	Uspostavljanje potrebne infrastrukture i njihovo povezivanje
12	RFID praćenje procesa	Označavanje svih komponenti koje prolaze kroz proces i njihovo povezivanje s okolnim strojevima i uređajima	Uspostavljanje mreže s velikom brzinom prijenosa podataka i IT resursi
13	Automatizacija i robotizacija skladištenja	Samooptimizacija skladišnog poslovanja uz smanjenje teških fizičkih poslova za zaposlenike	Povezivanje uskladištenih komponenti s dostavnim aktivnostima materijala
14	Aditivna proizvodnja	Izrada segmenata opreme iz kompozitnih materijala odgovarajuće kvalitete	Razvoj i primjena kompozitnih materijala u proizvodnji
15	Centralizirano znanje	Prikupljanje i obrada podataka na jednom mjestu	Standardiziranim procesima obučiti zaposlenike kao i pravovremen prijenos znanja
16	Napredno planiranje	Predviđanje aktivnosti dugoročno uz samooptimizaciju aktivnosti	Formiranje adaptivnih prilagođenih programa za kratkoročne i dugoročne rokove
17	Prediktivna analitika	Predviđanje potreba za alatima, zamjenskim strojevima, potrebnim sirovinama i racionalno korištenje resursa	Pojam učiniti dostupnim kod posebno obučених zaposlenika te primjena kao standard
18	Robotizirano paletiziranje	Primjena robota u paletiziranju komponenti procesa	Uspostavljanje standardiziranog paletiziranog procesa
19	Autonomna vozila	Transportne aktivnosti potpuno računalno navođene i nadgledane	Razvoj transportnih vozila kao računala s prediktivnim proračunima
20	Prediktivno održavanje	Priprema za aktivnosti održavanja bez utjecaja na neometano odvijanje procesa	Prilagodba resursa s odgovarajućim aktivnostima praćenja

4. PRIJEDLOG METODOLOGIJE ZA POSTUPAK IMPLEMENTACIJE ODABRANIH ELEMENATA KONCEPTA *BRODOGRADNJA 4.0*

4.1 Uvod

Temeljem istraživanja čiji su rezultati predstavljeni u prethodnom poglavlju, te usvojenih znanja istraživanjem tijekom poslijediplomskog studija i profesionalnog razvoja u brodograđevnoj industriji, došlo se do zaključka o nedostatku adekvatne metodologije optimalnog procesa implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, stoga je ista osmišljena, predložena i prezentirana u ovom poglavlju.

U ovom istraživanju analizirani su elementi koncepta *Brodogradnja 4.0* relevantni za implementacijski proces, koji su nastali kao rezultat prikupljenih istraživanja korištenjem metode anketiranja, provedene među ekspertima iz svih segmenata brodograđevne industrije.

Predložena metodologija za implementacije koncepta *Brodogradnja 4.0* zasniva se na provođenju postupka koja se sastoji od četiri faze kroz koje se dolazi do optimalnog projektnog rješenja.

U *prvoj fazi* definirani su odabrani elementi koncepta *Brodogradnja 4.0* prikupljeni metodom anketiranja, utvrđeni su posebni težinski faktori odnosno ponderi kojima se definiraju pokazatelji odnosa bliskosti odabranih elemenata koncepta, a sa stajališta optimalnog postupka implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* na proizvodni proces.

Utvrđeni ponderi predstavljaju poseban doprinos i primjenjivi su na bilo koji proizvodni proces na koji se primjenjuje predložena metodologija.

Također, iz ankete su dobiveni podaci o utjecaju (važnosti) pojedinih kriterija (ograničenja), izvršena je usporedba odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, odnosno postavljen redoslijed njihove primjene kao prioriteta za unaprjeđenje procesa.

U *drugoј fazi* generirani se odabrani elementi koncepta *Brodogradnja 4.0*, utvrđuju se kriteriji (ograničenja) prikupljeni metodom anketiranja, na temelju kojih se hijerarhijskim modeliranjem uz korištenje *AHP* metode (*eng. Analytic Hierarchy Process*) vrši analiza i odabir optimalnog postupka kao konačnog projektnog rješenja, odnosno metodologije implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*.

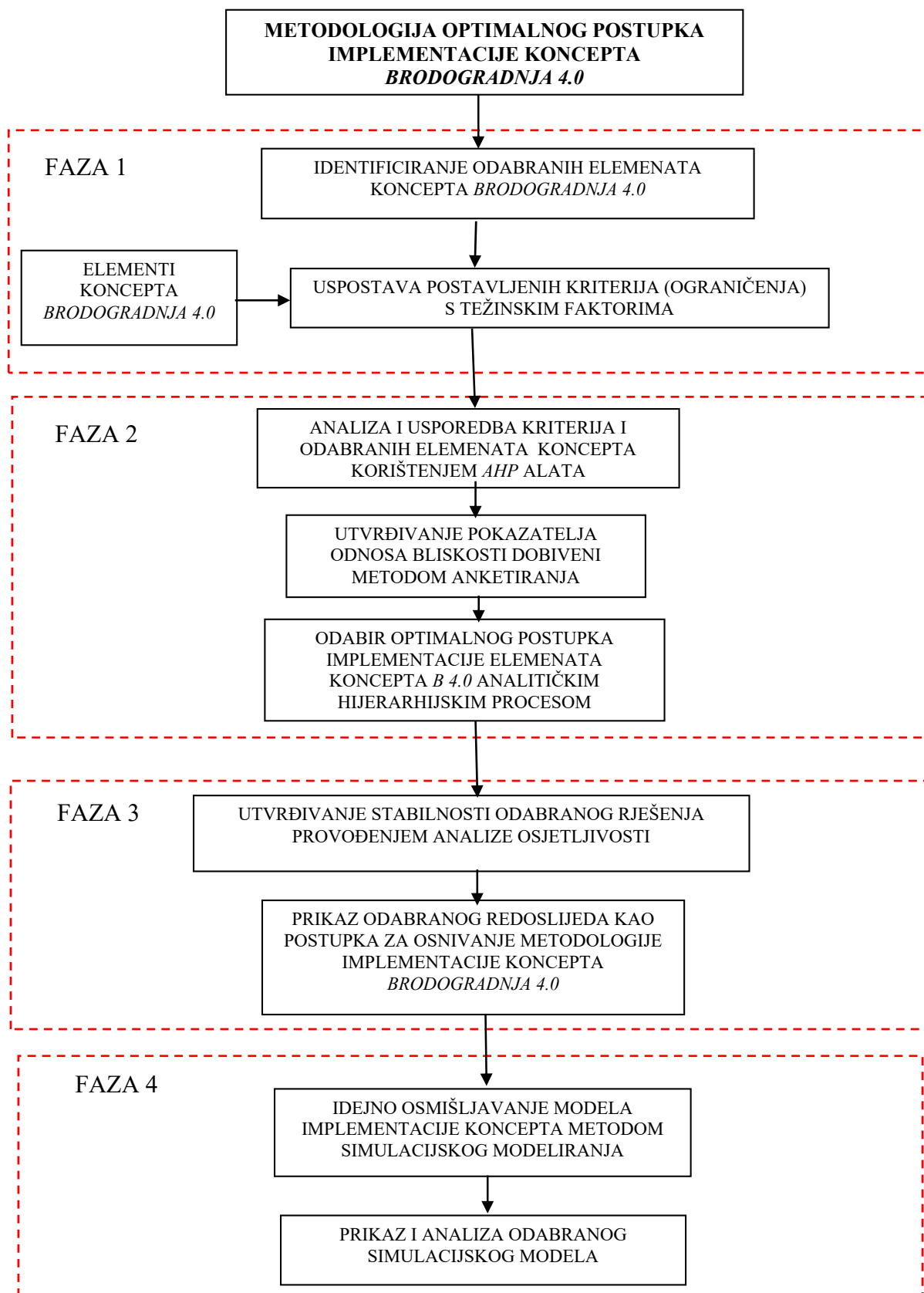
U ovoj fazi predstavljena su ograničenja odnosno kriteriji na temelju kojih se hijerarhijskim modeliranjem korištenjem analitičkog hijerarhijskog procesa (*eng. Analytic Hierarchy Process - AHP*) analiziraju i uspoređuju elementi koncepta prema svakom kriteriju međusobno, te ih se formira u ljestvici kao konačno predloženo projektno rješenje primjene implementacije koncepta *Brodogradnja 4.0* na brodograđevni proizvodni proces.

U *trećoj fazi* vrši se potvrda stabilnosti predloženog rješenja implementacije koncepta *Brodogradnja 4.0* primjenom analize osjetljivosti.

U *četvrtoj fazi* odabrano optimalno projektno rješenje predstavlja temelj za daljnju razradu primjene koncepta *Brodogradnja 4.0* kroz eksperiment simulacijskim modeliranjem, na način da se osmišljava simulacijski proces a potom i provodi metodom simulacijskog modeliranja za odabrani segment proizvodnog procesa.

Sam postupak, metode, alati i tehnike na kojima se temelji predložena metodologija predstavljeni su u daljnjem tekstu i na blok dijagramu prikazanom na slici br. 4.1.

Za primjenu predložene metodologije kod predstavljanja implementacije koncepta želi se dostići najviša tehnološka razina primjene koncepta *Brodogradnja 4.0*.



Slika 4.1. Blok dijagram predložene metodologije

4.2. FAZA 1 – Identificiranje odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*

4.2.1 Odabir elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*

Za *prvu fazu* predložene metodologije izvršen je odabir elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, za koje je dosadašnjim istraživanjem utvrđeno da mogu direktno participirati u brodograđevnom procesu; odabrani elementi koncepta *Brodogradnja 4.0* selektirani su i analizirani kroz anketni upitnik predstavljen u prethodnom poglavlju.

Anketom su prikupljeni podaci o važnosti elemenata koncepta, odnosno formirana je ljestvica prioriteta za implementaciju u brodograđevnom procesu. Ovim istraživanjem prikupljeni su podaci o postojećem stanju u tvrtkama iz brodograđevnog sektora što je imalo za cilj utvrditi svjesnost ispitanika o trenutnom stanju u brodograđevnoj industriji ali i prikupiti i opisati smjernice prema najvišoj tehnološkoj razini *Brodogradnji 4.0*.

Slijedom ankete navedeni elementi koncepta *Brodogradnja 4.0* predstavljaju ulazni parametar za slijedeću fazu.

Nevedeni su slijedeći odabrani elementi koncepta *Brodogradnja 4.0* koji se razmatraju prilikom implementacije u odabranom brodograđevnom procesu, te su predstavljeni u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Odabrani elementi koncepta *Brodogradnja 4.0*

Br.	Odabrani elementi koncepta <i>Brodogradnja 4.0</i>
1	Internet stvari (<i>eng. Internet of Things, IoT</i>)
2	Kibernetско – fizički sustavi (<i>eng. Cyber – Physical Systems, CPS</i>)
3	Digitalni blizanac (<i>eng. Digital Twin, DT</i>)
4	Kibernetска sigurnost (<i>eng. Cyber Security, CS</i>)
5	Velika baza podataka (<i>eng. Big Data, BD</i>)
6	Virtualna i proširena stvarnost (<i>eng. Augmented Reality/Virtual Reality, AR/VR</i>)
7	Aditivna proizvodnja (<i>eng. Additive Manufacturing, AM</i>)
8	Autonomni transport (<i>eng. Autonomus Vehicles, AVS</i>)
9	Modeliranje i simuliranje proizvoda i procesa (<i>eng. Modelling & Simulation of Production Processes, MPS</i>)
10	Robotska automatizacija procesa (<i>eng. Robotic Process Automation, RPA</i>)
11	Fleksibilnost proizvodnog procesa (<i>eng. Production Process Flexibility, PPF</i>)
12	Pametno napredno planiranje u vremenu (<i>eng. Smart Real Time Planning, SRP</i>)
13	Automatizacija i robotizacija procesa skladištenja (<i>eng. Warehouse Automatization and Robotization, WAR</i>)
14	Progresivno RFID povezivanje (<i>eng. Progressive RFID interconnectivity, PI</i>)
15	Rad u sigurnom oblaku (<i>eng. Cloud Computing, CC</i>)
16	Prediktivno održavanje (<i>eng. Predictive Maintenance, PM</i>)
17	Prediktivna analitika (<i>eng. Predictive Analytics, PA</i>)
18	Podrška donošenju odluka (<i>eng. Decision Making Support, DSM</i>)
19	Sustav samooptimizacije (<i>eng. Self-Optimization Systems, SS</i>)
20	Integrirana nabava (<i>eng. Integrated Supply Chain, ISC</i>)

Implementacijski koncept *Brodogradnja 4.0* i reorganizacija proizvodnog procesa direktno utječu na poslovanje tvrtke kao i na postojeće proizvodne tokove, stoga je formiranje kriterija odnosno ograničenja ulazni parametar za slijedeće korake u razvoju metodologije.

4.2.2 Uspostava postavljenih kriterija (ograničenja)

Kako je prethodno navedeno, s obzirom na definirani cilj osmišljavanja metodologije implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, slijedi određivanje kriterija (ograničenja) koji predstavljaju ulazne parametre za daljnju razradu metodologije. Da bi se mogao formirati optimalni redoslijed implementacije koncepta *Brodogradnja 4.0* potrebno je utvrditi postavljena ograničenja odnosno kriterije koje će potencijalni redoslijed kao rješenje optimalno zadovoljiti.

U anketnom istraživanju predstavljenom u prethodnom poglavlju ispitanicima je ponuđena mogućnost odabira i usporedbe odabranih kriterija (ograničenja) koje je potencijalno potrebno uzeti u obzir prilikom implementacijskog procesa.

Ispitanici su izdvojili pet najutjecajnijih kriterija za koje drže najvažnijim da ih treba uzeti u obzir prilikom razmatranja implementacije odabranih elemenata koncepta:

1. Kriterij 1: *Cijena investicije*,
2. Kriterij 2: *Povećanje produktivnosti*,
3. Kriterij 3: *Povećanje kvalitete*,
4. Kriterij 4: *Vremenski period implementacije*,
5. Kriterij 5: *Složenost implementacije*

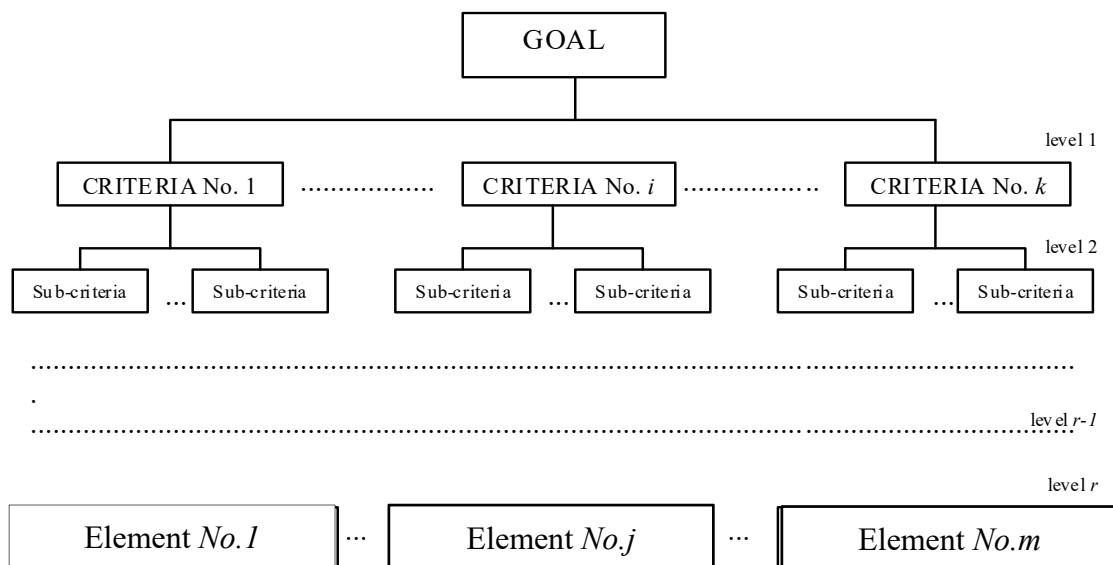
4.3 FAZA 2 – Analiza usporedbe kriterija korištenjem *AHP* alata

4.3.1 Analitički hijerarhijski proces (eng. *Analytic hierarchy process - AHP*)

AHP (*Analitički hijerarhijski proces*) postupak je modeliranja strukturirane tehnike za rješavanje složenih odluka. Koristi se primjenom u grupnom odlučivanju i pomaže donositelju odluka za iznalaženje optimalnog rješenja vodeći računa o definiranim ograničenjima. Slika 4.2 prikazuje hijerarhijsku strukturu *AHP* modela [80].

Cilj je postavljen na najvišu hijerarhijsku razinu i ne uspoređuje se s nijednim drugim elementom. Na prvoj razini nalazi se k kriterija koji se međusobno uspoređuju u parovima s obzirom na izravno nadređeni - cilj.

Potrebno je sveukupno $k \cdot (k - 1) / 2$ uspoređivanja. Postupak se ponavlja za slijedeću hijerarhijsku razinu, pa sve do posljednje r (razina usporedbe), dok se ne izvrše usporedbe svih elemenata u odnosu na nadređene kriterije.

Slika 4.2 Hijerarhijski model *AHP* procesa [80]

Svako uspoređivanje dva elementa hijerarhijske strukture (modela) vrši se korištenjem *Saaty*-eve skale vrednovanja, tablica 4.2.

Tablica 4.2 *Saaty*-eva temeljna skala vrednovanja relativne važnosti [80]

Značaj	Definicija	Opis
1	Jednako važno	Dvije aktivnosti jednako doprinose cilju
3	Umjereno važnije	Iskustvo i dojam su umjereno na strani jedne aktivnosti
5	Strogo važnije	Iskustvo i dojam su strogo na strani jedne aktivnosti
7	Vrlo stroga važnost	Jedna aktivnost je vrlo dominantna nad drugom
9	Ekstremna važnost	Jedna aktivnost je apsolutno dominantna nad drugom
2,4,6,8	Međuvrijednost	Potreban kompromis ili daljnja podjela

$$S = \left\{ \frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 \right\} \quad (1)$$

U izrazu (1), S označava skup mogućih vrijednosti dodjeljivih međusobnom odnosu dvaju promatranih elemenata unutar hijerarhijske strukture.

Rezultati elemenata uspoređenih na hijerarhijskoj razini i organizacija u matrici prikazani su jednadžbom (2).

Ako se n elemenata međusobno uspoređuju s obzirom na superiorni nadređeni element na višoj hijerarhijskoj razini, tada se, kada se uspoređuje i element s j elementom pomoću Saaty-jeve skale vrednovanja, utvrđuje numerički koeficijent a_{ij} i postavlja na odgovarajuće mjesto u matrici A :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdot & \cdot & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdot & \cdot & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdot & \cdot & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Inverzna vrijednost rezultata postavlja se u položaj a_{ji} radi održavanja konzistentnosti u donošenju odluka [80]. Ukoliko je element 1 neznatno favoriziran u odnosu na element 2, na drugom mjestu u matrici a_{12} bit će broj 3 Saatyjeve skale, a na mjestu a_{21} bit će njegova recipročna vrijednost $1/3$.

Usporedba se nadalje vrši do posljednje razine na kojoj se nalaze odabrani elementi, a s završetkom uspoređivanja definira se kompozitni težinski koeficijent svih elemenata. Zbroj svih koeficijenata je 1, a donosiocu odluka pomaže skaliranjem značaja elemenata u odnosu na cilj smješten na vrhu hijerarhijske ljestvice, ali i omogućuje formiranje ljestvice elemenata po procijenjenom značaju.

Donosioc odluka dobiva saznanja o:

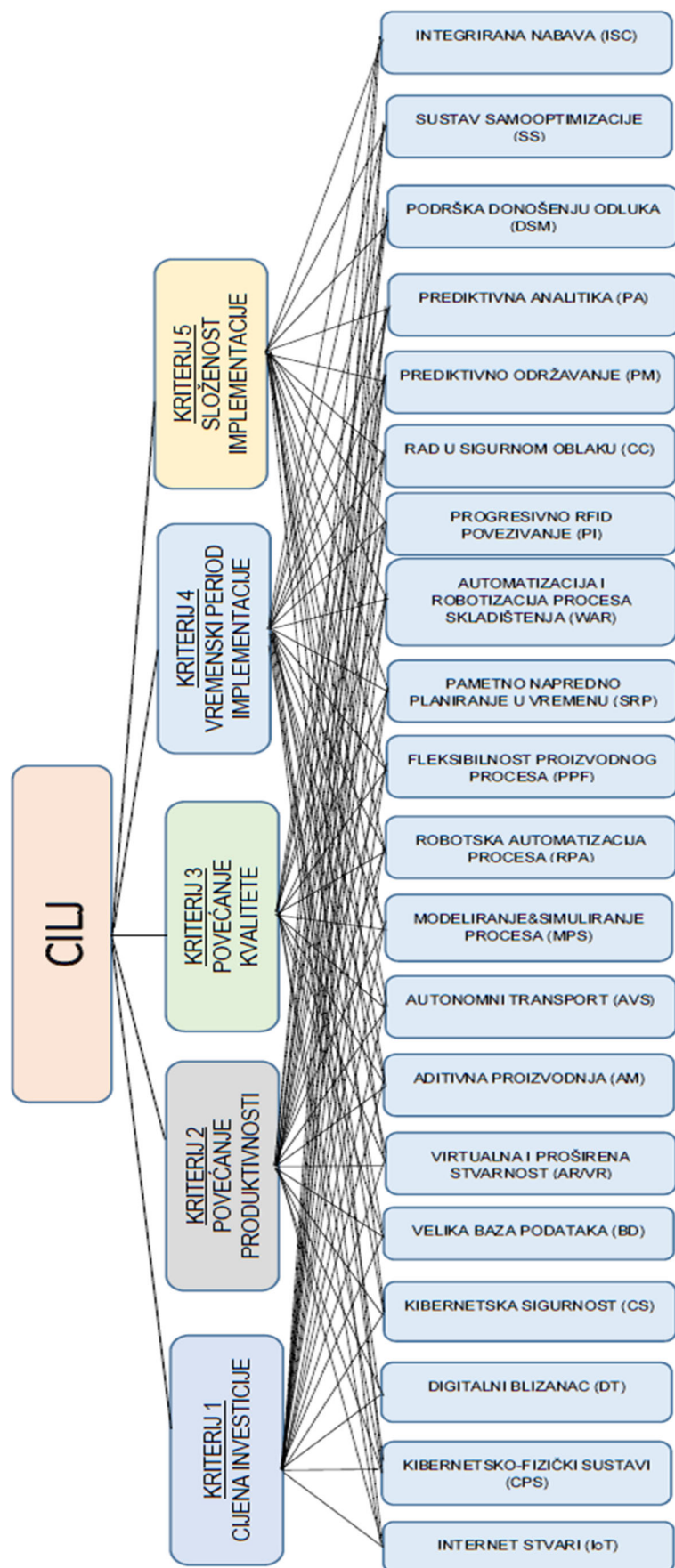
- Relativnom značaju elemenata u odnosu na cilj smješten na vrhu hijerarhijske ljestvice,
- Formiranju redoslijeda elemenata prema značaju (rangiranje).

4.4. Usporedba kriterija i elemenata koncepta korištenjem *AHP* alata

Na slici 4.3 prikazana je hijerarhijska struktura problema koji se razmatra uz korištenje *AHP* alata.

Kako je vidljivo na vrhu se nalazi cilj, potom je odabrano pet kriterija za usporedbu na slijedećoj hijerarhijskog razini, te potom skupina odabranih elemenata koncepta koji se uspoređuju u odnosu na svaki od odabranih kriterija.

Kriteriji i odabrani elementi koncepta uspoređuju se korištenjem *Saaty-jeve* skale, te se formira tablica usporedbe kriterija međusobno na način da se brojčanim vrijednostima određuju omjeri važnosti. Usporedba se vrši u parovima, svaki sa svakim. Dijagram prikaza usporedbe kriterija i elemenata koncepta po parovima prikazan je na slici 4.3.

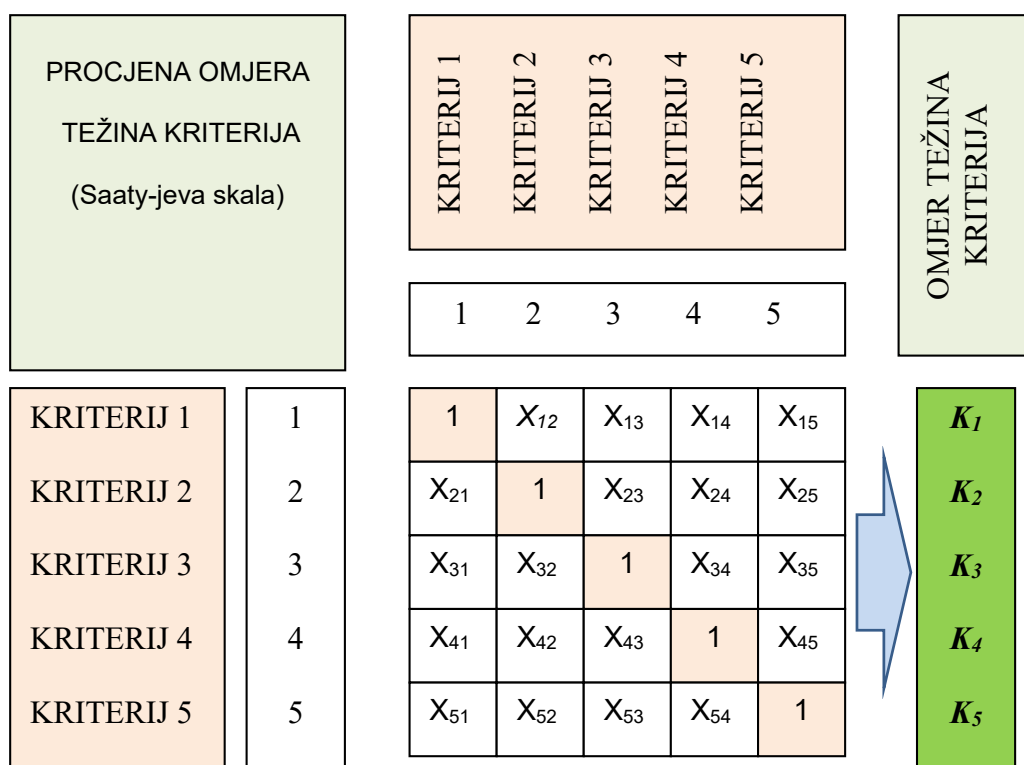


Slika 4.3 Hijerarhijski AHP model

4.5. Utvrđivanje odnosa bliskosti i pripadajućih težinskih faktora

Za utvrđivanje pokazatelja odnosa bliskosti kriterija i odabranih elemenata koncepta, potrebno je imati ciljanu tehnološku razinu implementacijskog koncepta, a to je u ovom slučaju najviša implementacijska tehnološka razina *Brodogradnja 4.0*.

Pošto su definirani kriteriji, pristupa se njihovoj međusobnoj usporedbi prema postavljenom cilju korištenjem *Saaty-jeve* skale. Kriteriji se međusobno uspoređuju u parovima, izračun omjera težina kriterija korištenjem *AHP* alata prikazan je na slici 4.4.



Slika 4.4 Izračun omjera težina kriterija pomoću *AHP* alata

U okviru prilagođenog *AHP* alata vrši se usporedba omjera težina kriterija pomoću Saaty-jeve skale usporedbe u odnosu na definirani cilj, a potom se odabrani elementi koncepta međusobno uspoređuju prema svakom od odabranih kriterija. Njihove lokalne težine izračunavaju se korištenjem prilagođenog *AHP* alata.

Usporedba kriterija međusobno se vrši u parovima, u odnosu na to koliko je jedan od kriterija važniji od drugog u funkciji cilja.

U tablici usporedbe gdje se kriteriji međusobno uspoređuju, u poljima koja se nalaze u dijagonali, kriteriji se uspoređuju sami sa sobom i tu se upisuje vrijednost 1 (1:1).

Krajnji cilj je rezultat odnosno dobivanje omjera težina pojedinih kriterija, K_1 do K_5 . Ponekad su kriteriji kontradiktorni pa se razmatra koji će se kriteriji favorizirati.

Dobivenim omjerima težina može se formirati ljestvica kriterija prema važnosti, odnosno time se može omogućiti formiranje odabranih elemenata koncepta koji moraju zadovoljiti pojedine kriterije kako bi se dobio optimalni redoslijed.

Izračun omjera težina kriterija korištenjem *Saaty-jeve* skale prikazan je u tablici 4.3.

Tablica 4.3 Izračun omjera težina kriterija korištenjem *AHP* alata

Br	Omjer težina kriterija	Kriterij 1 <i>Cijena investicije</i>	Kriterij 2 <i>Povećanje produktivnosti</i>	Kriterij 3 <i>Povećanje kvalitete</i>	Kriterij 4 <i>Vremenski period implementacije</i>	Kriterij 5 <i>Složenost implementacije</i>
1	Kriterij 1 <i>Cijena investicije</i>	1	3	5	5	5
2	Kriterij 2 <i>Povećanje produktivnosti</i>	1/3	1	1	3	3
3	Kriterij 3 <i>Povećanje kvalitete</i>	1/3	1	1	3	1
4	Kriterij 4 <i>Vremenski period implementacije</i>	1/5	1/3	1/3	1	5
5	Kriterij 5 <i>Složenost implementacije</i>	1/5	1/3	1	1/5	1
	SUMA	1,933	5,666	8,333	12,200	15,000

Rezultat međusobne usporedbe kriterija iz tablice 4.3 opisuje se na način da npr. u retku br. 1, kriterij 1 *cijena investicije*, u skladu sa *Saaty-jevom* skalom usporedbe

dominira u odnosu na kriterij 2 *povećanje produktivnosti* 3:1, dok je npr. kriterij 2 – povećanje produktivnosti i kriterij 3 – povećanje kvalitete, ocjenjen kao jednako značajan (1:1). Usporedbom kriterija nakon što se izvrši ocjenjivanje omjera težina može se formirati rangiranje kriterija prema važnosti kako je prikazano u tablici 4.4. Izračun težinskih koeficijenata prikazan je u Privitku br. 3 ovog rada.

Kao najvažniji proizašao je kriterij *K1 - cijena investicije*, potom kriterij *K2 - povećanje produktivnosti*, potom kriterij *K3 - povećanje kvalitete*, kriterij *K4 - vremenski period implementacije* i posljednji kriterij *K5 - složenost implementacije*.

Tablica 4.4 Redoslijed vrijednosti težine kriterija

		Vrijednost težine kriterija K_i
1	Kriterij 1 <i>Cijena investicije</i>	0,475
2	Kriterij 2 <i>Povećanje produktivnosti</i>	0,185
3	Kriterij 3 <i>Povećanje kvalitete</i>	0,144
4	Kriterij 4 <i>Vremenski period implementacije</i>	0,124
5	Kriterij 5 <i>Složenost implementacije</i>	0,072

Na isti način, temeljem prikupljenih podataka, vrši se usporedba odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* prema odabranim kriterijima, što nadalje omogućuje definiranje koje kriterije odabrani elementi koncepta moraju prvenstveno zadovoljiti kako bi se kao rezultat dobio optimalni redoslijed kao postupak implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*.

Dobiveni ponderi formirani su temeljem anketnog istraživanja i prikazani u Privitku br. 3 ovog rada.

Rezultati istraživanja predstavljeni su na način, da su se formirali ponderi odabranih elemenata koncepta s obzirom na svaki od kriterija, a potom su se elementi

koncepta *Saaty-jevom* skalom uspoređivali međusobno kako bi se dobili težinski faktori i formirao redoslijed elemenata koncepta.

Ispitanicima je ponuđeno rangiranje elemenata koncepta u ovisnosti o odabranim kriterijima (ograničenjima) na način da su utjecaj pojedinih elemenata koncepta trebali ocjenjivati na skali od 1 do 9, gdje je 1 najmanje utjecajan, a element ocjenjen sa 9 je najutjecajniji (apsolutno dominantan) element koncepta.

Ponderi su dobiveni postupkom normaliziranog vektora, koji se dobije kao suma prosječnih rangova svih odabranih elemenata koncepta. Potom se ponder pojedinog elementa računa na način da se prosječna vrijednost pojedinog pondera podijeli sa sumom prosječnih vrijednosti rangova svih elemenata. Ponderi se zaokružuju na 4 decimale, a suma svih pondera mora biti 1.0.

Rangovi s ponderima temeljnih odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* u ovisnosti o pojedinim kriterijima dani su tablici 4.5.

Tablica 4.5 Ponderi odabranih elemenata koncepta u ovisnosti o kriterijima

	K1 - Cijena investicije		K2 – Povećanje produktivnosti		K3 – Povećanje kvalitete		K4 – Vremenski period implementacije		K5 – Složenost implementacije	
	Prosječni rang	Ponderi	Prosječni rang	Ponderi	Prosječni rang	Ponderi	Prosječni rang	Ponderi	Prosječni rang	Ponderi
Odabrani elementi koncepta <i>Brodogradnja 4.0</i>										
Internet stvari (IoT)	7,8300	0,0675	7,7372	0,0667	8,0620	0,0695	7,9112	0,0682	7,4356	0,0641
Kibernetiko - fizički sustavi (CPS)	7,0644	0,0609	7,0992	0,0612	7,1224	0,0614	5,9624	0,0514	5,9392	0,0512
Digitalni blizanač (DT)	9,3380	0,0805	9,1988	0,0793	8,9436	0,0771	8,8740	0,0765	8,5492	0,0737
Kibernetika sigurnost (CS)	4,6516	0,0401	4,7676	0,0411	4,6748	0,0403	5,6608	0,0488	5,5912	0,0482
Velika baza podataka (BD)	4,7444	0,0409	6,4728	0,0558	5,7072	0,0492	6,6584	0,0574	4,8836	0,0421
Virtualna i proširena stvarnost (AR/VR)	8,1316	0,0701	7,1456	0,0616	7,1224	0,0614	7,6328	0,0658	7,1456	0,0616
Aditivna proizvodnja (AM)	4,6632	0,0402	3,6424	0,0314	4,5936	0,0396	4,6168	0,0398	4,4196	0,0381
Autonomni transport (AVS)	5,3940	0,0465	3,5380	0,0305	5,6028	0,0483	3,9904	0,0344	5,2084	0,0449
Modeliranje i simuliranje proizvoda i procesa (MSP)	9,1292	0,0787	8,1084	0,0699	7,4936	0,0646	8,0620	0,0695	7,8184	0,0674
Robotska automatizacija procesa (RPA)	6,1364	0,0529	6,2408	0,0538	6,1248	0,0528	6,3104	0,0544	6,2176	0,0536
Fleksibilnost proizvodnog procesa (PPF)	4,7676	0,0411	4,8140	0,0415	3,6888	0,0318	5,9508	0,0513	6,0668	0,0523
Pametno napredno planiranje u vremenu (SRP)	4,6632	0,0402	5,9392	0,0512	6,0204	0,0519	5,6260	0,0485	5,8464	0,0504
Automatizacija i robotizacija procesa skladištenja (WAR)	4,0252	0,0347	5,6724	0,0489	4,8836	0,0421	5,0576	0,0436	5,0344	0,0434
Progresivno RFID povezivanje (PI)	8,6652	0,0747	8,4100	0,0725	9,2220	0,0795	7,5284	0,0649	7,8648	0,0678
Rad u sigurnom oblaku (CC)	7,1456	0,0616	7,5980	0,0655	7,7140	0,0665	7,2036	0,0621	7,1804	0,0619
Prediktivno održavanje (PM)	4,4660	0,0385	3,2248	0,0278	2,4824	0,0214	2,4592	0,0212	2,8188	0,0243
Prediktivna analitika (PA)	3,6076	0,0311	3,5496	0,0306	3,5380	0,0305	5,2432	0,0452	4,8372	0,0417
Podrška donošenju odluka (DMS)	2,4476	0,0211	2,3780	0,0205	2,8188	0,0243	3,5728	0,0308	3,2596	0,0281
Sustav samooptimizacije (SS)	3,9556	0,0341	5,6376	0,0486	6,3916	0,0551	3,7816	0,0326	4,8604	0,0419
Integrirana nabava (ISC)	5,1736	0,0446	4,8256	0,0416	3,7932	0,0327	3,8976	0,0336	5,0228	0,0433
SUMA	116	1	116	1	116	1	116	1	116	1

Usporedba i rangiranje odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* s obzirom na svaki od odabranih kriterija vrši se na slijedeći način:

- Uvođenje elemenata koncepta za koje se procjenjuje da je tvrtka spremnija investirati, što znači da elementi u koje je tvrtka sprema investirati imaju veći ponder,
- Uvođenje elemenata koncepta koji tvrtka procjenjuje da će utjecati na veću produktivnost, znači da ti elementi koji utječu na povećanje produktivnosti imaju veći ponder,
- Uvođenje elemenata koji tvrtka procjenjuje da će utjecati na veću kvalitetu konačnog proizvoda, znači da ti elementi koncepta koji utječu na povećanje kvalitete proizvoda imaju veći ponder,
- Uvođenje elemenata koncepta s kraćim vremenskim periodom implementacije, znači da elementi koji će u kraćem vremenu donijeti povrat investicije imaju veći ponder,
- Uvođenje elemenata koncepta s manjom složenošću izvedbe, znači da ti elementi zahtijevaju jednostavniju izvedbu te imaju veći ponder.

Nadalje, vrši se usporedba odabranih elemenata koncepta međusobno, na način da se uspoređuju u parovima, svaki sa svakim s obzirom na svaki od kriterija od 1 do 5. Usporedba se vrši pomoću *Saaty-jeve* skale, gdje se elementi koncepta uspoređuju na način da svako numerirano polje definira sučeljavanje dvaju elemenata s obzirom na pojedini kriterij, kako je prikazano na slici 4.5.

USPOREDBA U PAROVIMA PO KRITERIJU k = 1...5	ELEMENT KONCEPTA 1	ELEMENT KONCEPTA 2	ELEMENT KONCEPTA 3	ELEMENT KONCEPTA 4	ELEMENT KONCEPTA 5	ELEMENT KONCEPTA 6	ELEMENT KONCEPTA 7	ELEMENT KONCEPTA 8	ELEMENT KONCEPTA 9	ELEMENT KONCEPTA 10	ELEMENT KONCEPTA 11	ELEMENT KONCEPTA 12	ELEMENT KONCEPTA 13	ELEMENT KONCEPTA 14	ELEMENT KONCEPTA 15	ELEMENT KONCEPTA 16	ELEMENT KONCEPTA 17	ELEMENT KONCEPTA 18	ELEMENT KONCEPTA 19	ELEMENT KONCEPTA 20
	E _{k-1}	E _{k-2}	E _{k-3}	E _{k-4}	E _{k-5}	E _{k-6}	E _{k-7}	E _{k-8}	E _{k-9}	E _{k-10}	E _{k-11}	E _{k-12}	E _{k-13}	E _{k-14}	E _{k-15}	E _{k-16}	E _{k-17}	E _{k-18}	E _{k-19}	E _{k-20}

LOKALNI PRIORITETI ZA K-I		E_{k-1}	E_{k-2}	E_{k-3}	E_{k-4}	E_{k-5}	E_{k-6}	E_{k-7}	E_{k-8}	E_{k-9}	E_{k-10}	E_{k-11}	E_{k-12}	E_{k-13}	E_{k-14}	E_{k-15}	E_{k-16}	E_{k-17}	E_{k-18}	E_{k-19}	E_{k-20}
---------------------------	--	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

Slika 4.5 Izračun lokalnih prioriteta elemenata koncepta prema svakom od kriterija

Na slici 4.5 svako od polja prikazuje omjer važnosti između odabranih elemenata koncepta gdje se upisuje odgovarajući broj prema *Saaty-jevoj* skali. Na isti način se u ostalim poljima navedene tablice vrši uspoređivanje, gdje svako pojedino polje predstavlja sučeljavanje dvaju odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*.

Odabranih sučelja koje je potrebno analizirati i ispuniti ima onoliko koliko ima i postavljenih kriterija, u ovom slučaju pet. U prvom sučelju se vrši usporedba odabranih elemenata koncepta prema kriteriju 1 (*cijena investicije*), u drugom na temelju kriterija 2 (*povećanje produktivnosti*), potom usporedba odabranih elemenata koncepta prema kriteriju 3 (*povećanje kvalitete*). U četvrtom sučelju vrši se usporedba odabranih elemenata koncepta prema kriteriju 4 (*vremenski period implementacije*) i sve redom do posljednjeg kriterija 5 (*složenost implementacije*).

Nadalje, utvrđeni rezultati lokalnih prioriteta s utvrđenim omjerima težina pojedinih kriterija prenose se u sučelje kojim dobivamo konačni izračun prioriteta prikazan slikom 4.6.

OMJERI TEŽINA KRITERIJA	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	UKUPNI PRIORITETI ELEMENTATA KONCEPTA
LOKALNI PRIORITETI ELEMENTATA KONCEPTA PREMA POJEDINIM KRITERIJIMA	KRITERIJ 1	KRITERIJ 2	KRITERIJ 3	KRITERIJ 4	KRITERIJ 5	
ELEMENT KONCEPTA 1	E_{1-1}	E_{2-1}	E_{3-1}	E_{4-1}	E_{5-1}	P_1
ELEMENT KONCEPTA 2	E_{1-2}	E_{2-2}	E_{3-2}	E_{4-2}	E_{5-2}	P_2
ELEMENT KONCEPTA 3	E_{1-3}	E_{2-3}	E_{3-3}	E_{4-3}	E_{5-3}	P_3
ELEMENT KONCEPTA 4	E_{1-4}	E_{2-4}	E_{3-4}	E_{4-4}	E_{5-4}	P_4
ELEMENT KONCEPTA 5	E_{1-5}	E_{2-5}	E_{3-5}	E_{4-5}	E_{5-5}	P_5
ELEMENT KONCEPTA 6	E_{1-6}	E_{2-6}	E_{3-6}	E_{4-6}	E_{5-6}	P_6
ELEMENT KONCEPTA 7	E_{1-7}	E_{2-7}	E_{3-7}	E_{4-7}	E_{5-7}	P_7
ELEMENT KONCEPTA 8	E_{1-8}	E_{2-8}	E_{3-8}	E_{4-8}	E_{5-8}	P_8
ELEMENT KONCEPTA 9	E_{1-9}	E_{2-9}	E_{3-9}	E_{4-9}	E_{5-9}	P_9
ELEMENT KONCEPTA 10	E_{1-10}	E_{2-10}	E_{3-10}	E_{4-10}	E_{5-10}	P_{10}
ELEMENT KONCEPTA 11	E_{1-11}	E_{2-11}	E_{3-11}	E_{4-11}	E_{5-11}	P_{11}
ELEMENT KONCEPTA 12	E_{1-12}	E_{2-12}	E_{3-12}	E_{4-12}	E_{5-12}	P_{12}
ELEMENT KONCEPTA 13	E_{1-13}	E_{2-13}	E_{3-13}	E_{4-13}	E_{5-13}	P_{13}
ELEMENT KONCEPTA 14	E_{1-14}	E_{2-14}	E_{3-14}	E_{4-14}	E_{5-14}	P_{14}
ELEMENT KONCEPTA 15	E_{1-15}	E_{2-15}	E_{3-15}	E_{4-15}	E_{5-15}	P_{15}
ELEMENT KONCEPTA 16	E_{1-16}	E_{2-16}	E_{3-16}	E_{4-16}	E_{5-16}	P_{16}
ELEMENT KONCEPTA 17	E_{1-17}	E_{2-17}	E_{3-17}	E_{4-17}	E_{5-17}	P_{17}
ELEMENT KONCEPTA 18	E_{1-18}	E_{2-18}	E_{3-18}	E_{4-18}	E_{5-18}	P_{18}
ELEMENT KONCEPTA 19	E_{1-19}	E_{2-19}	E_{3-19}	E_{4-19}	E_{5-19}	P_{19}
ELEMENT KONCEPTA 20	E_{1-20}	E_{2-20}	E_{3-20}	E_{4-20}	E_{5-20}	P_{20}

Slika 4.6 Izračun ukupnih prioriteta pomoću *AHP* alata

Izračunom vrijednosti lokalnih prioriteta te pripadajućih težinskih faktora pomoću izraza (3) dobiva se vrijednost ukupnih prioriteta pojedinih odabranih elemenata koncepta.

$$P_i = E_{1-i} \times K_1 + E_{2-i} \times K_2 + E_{3-i} \times K_3 + E_{4-i} \times K_4 + E_{5-i} \times K_5 \quad (3)$$

gdje je:

P_i - ukupni prioritet i-tog odabranog elementa koncepta,

E_{1-i} - lokalni prioritet i-tog odabranog elementa koncepta s obzirom na kriterij 1,

E_{2-i} - lokalni prioritet i-tog odabranog elementa koncepta s obzirom na kriterij 2,

E_{3-i} - lokalni prioritet i-tog odabranog elementa koncepta s obzirom na kriterij 3,

- E_{4-i} - lokalni prioritet i-tog odabranog elementa koncepta s obzirom na kriterij 4,
- E_{5-i} - lokalni prioritet i-tog odabranog elementa koncepta s obzirom na kriterij 5.
- K_{1-5} - vrijednost težine pojedinog kriterija

Prikaz tijeka proračuna nadalje slijedi na način da su formirane matrice prema (2) u kojima su uneseni podaci uspoređivanjem u parovima a korištenjem *Saaty-jeve* skale za pojedine kriterije, gdje se za prvi red i prvi stupac analiziraju odabrani elementi koncepta pod brojem 1 (*Internet stvari, IoT*), drugi red i drugi stupac analiziraju usporedbu odabranog elementa koncepta pod brojem 2 (*Kibernetičko-fizički sustavi, CPS*), nadalje sve do analize posljednjeg odabranog elementa koncepta pod brojem 20 (*Integrirana nabava, ISC*).

Izračunavaju se ukupni prioriteti svih odabranih elemenata koncepta prema pojedinim kriterijima, te se s obzirom na pojedinačno dodijeljene prioritete želi formirati redoslijed odabranih elemenata koncepta koji optimalno zadovoljavaju odabrane kriterije. Temeljem utvrđenih vrijednosti prioriteta dobiva se ljestvica elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, koji optimalno prema manje optimalnom zadovoljavaju postavljenim kriterijima prema cilju; na taj način se formira redoslijed odnosno postupak implementacijskog procesa odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, od optimalnog odnosno onog s kojim treba započeti implementacijski proces, pa do posljednjeg na ljestvici koji najmanje optimalno zadovoljava prioritete usporedbom prema kriterijima i s njegovom implementacijom se može započeti u nešto kasnijoj fazi.

Ovakva metodologija omogućuje formiranje redoslijeda odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, na način da se formira ljestvica odabranih elemenata koncepta, od elementa koji najbolje udovoljava kriterijima do onog koji najnepovoljnije udovoljava kriterijima.

Kako bi se olakšao proces analize korišten je prilagođen *Microsoft Excel* alat, kojim se korištenjem analitičkog hijerarhijskog procesa formira izračun lokalnih i konačnih prioriteta odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*.

Matrice usporedbe odabranih elemenata koncepta (4) – (8) prema svakom od kriterija nalaze se u Pravitku br.3 ovog rada.

Matrica A_1 , izraz (4), odnosi se na uspoređivanje odabranih elemenata koncepta u parovima na osnovu kriterija 1 – *cijena investicije*, matrica A_2 prema izrazu (5) odnosi se na uspoređivanje elemenata koncepta u parovima na osnovu kriterija 2 – *povećanje produktivnosti*.

Nadalje, matrica A_3 prema izrazu (6), odnosi se na uspoređivanje odabranih elemenata koncepta u parovima prema kriteriju 3 – *povećanje kvalitete*. Matrica A_4 , izraz (7) odnosi se na uspoređivanje u parovima odabranih elemenata koncepta prema kriteriju 4 – *vremenski period implementacije*, dok matrica A_5 , prema izrazu (8) odnosi se na uspoređivanje u parovima odabranih elemenata koncepta prema kriteriju 5 – *složenost implementacije*.

Ovako posložen postupak doprinosi pristupačnosti donošenju odluka kod formiranja optimalnog postupka implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* u brodograđevnom proizvodnom procesu, na način da se pojednostavljuje posebno prilagođena metodologija unosa podataka pri izboru optimalnog redoslijeda implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*.

Pomoću *AHP* metode kao rezultat dobiju se rješenja matrica, a kao rezultat lokalnih prioriteta odnosno pondera u ovisnosti o svakom od pet kriterija. Rezultantne matrice lokalnih prioriteta s ponderima za svaku pojedinu matricu prikazane su slijedećim izrazom (9):

$$\begin{aligned}
 A_1 = & \begin{bmatrix} 0,0675 \\ 0,0609 \\ 0,0805 \\ 0,0401 \\ 0,0409 \\ 0,0701 \\ 0,0402 \\ 0,0465 \\ 0,0787 \\ 0,0529 \\ 0,0411 \\ 0,0402 \\ 0,0347 \\ 0,0747 \\ 0,0616 \\ 0,0385 \\ 0,0311 \\ 0,0211 \\ 0,0341 \\ 0,0446 \end{bmatrix} & A_2 = & \begin{bmatrix} 0,0667 \\ 0,0612 \\ 0,0793 \\ 0,0411 \\ 0,0558 \\ 0,0616 \\ 0,0314 \\ 0,0305 \\ 0,0699 \\ 0,0538 \\ 0,0415 \\ 0,0512 \\ 0,0489 \\ 0,0725 \\ 0,0655 \\ 0,0278 \\ 0,0306 \\ 0,0205 \\ 0,0486 \\ 0,0416 \end{bmatrix} & A_3 = & \begin{bmatrix} 0,0695 \\ 0,0614 \\ 0,0771 \\ 0,0403 \\ 0,0492 \\ 0,0614 \\ 0,0396 \\ 0,0483 \\ 0,0646 \\ 0,0528 \\ 0,0318 \\ 0,0519 \\ 0,0421 \\ 0,0795 \\ 0,0665 \\ 0,0214 \\ 0,0305 \\ 0,0243 \\ 0,0551 \\ 0,0327 \end{bmatrix} & A_4 = & \begin{bmatrix} 0,0682 \\ 0,0514 \\ 0,0765 \\ 0,0488 \\ 0,0574 \\ 0,0658 \\ 0,0398 \\ 0,0344 \\ 0,0695 \\ 0,0544 \\ 0,0513 \\ 0,0485 \\ 0,0436 \\ 0,0649 \\ 0,0621 \\ 0,0212 \\ 0,0452 \\ 0,0308 \\ 0,0326 \\ 0,0336 \end{bmatrix} & A_5 = & \begin{bmatrix} 0,0641 \\ 0,0512 \\ 0,0737 \\ 0,0482 \\ 0,0421 \\ 0,0616 \\ 0,0381 \\ 0,0449 \\ 0,0674 \\ 0,0536 \\ 0,0523 \\ 0,0504 \\ 0,0434 \\ 0,0678 \\ 0,0619 \\ 0,0243 \\ 0,0417 \\ 0,0281 \\ 0,0419 \\ 0,0433 \end{bmatrix} & (9)
 \end{aligned}$$

Slijedom izračuna matrica, pripadajući težinski faktori pojedinih kriterija prikazani su izrazom:

$$K_1 = [0,4750] ; K_2 = [0,1850]; K_3 = [0,1440]; K_4 = [0,1240]; K_5 = [0,0720] \quad (10)$$

Lokalni i ukupni prioriteti s ponderima izračunavaju se za svaki odabrani element koncepta u odnosu na svaki od kriterija.

Rezultati predstavljaju izračun ukupnih prioriteta na temelju rangiranja prioriteta kriterija i lokalnih prioriteta korištenjem prilagođenog AHP alata.

Lokalni i ukupni prioriteti računaju se za svaki od odabranih elemenata koncepta s obzirom na odabrane kriterije. Na osnovu utvrđenih prioriteta formira se redoslijed implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*.

4.6. Odabir optimalnog postupka implementacije koncepta

Kako je opisano u prethodnom poglavlju, kriteriji su se međusobno uspoređivali u parovima s obzirom na to koliko je jedan od kriterija važniji od drugog prema cilju. Potom su se odabrani elementi koncepta međusobno uspoređivali u parovima po svakom kriteriju, razmatrajući koliko i u kojoj mjeri se po pojedinom kriteriju daje prednost jednog odabranog elementa koncepta u odnosu na drugi.

Ukupni prioriteti odabranih elemenata koncepta izračunati su na način da su njihovi lokalni prioriteti ponderirani s pojedinačnim težinama odabranih elemenata koncepta u funkciji svakog od pojedinih kriterija.

Analizom utvrđenih prioriteta P_i odabire se rješenje koje ima najveću vrijednost, odnosno najbolje udovoljava postavljenim kriterijima, potom slijedeći element koncepta ljestvicom kako slijedi prema nižim vrijednostima, do posljednjeg koji najmanje optimalno udovoljava postavljenim kriterijima, čime se formira ljestvica optimalnog redoslijeda implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*.

Rang ljestvica redoslijeda implementacije odabranih elemenata koncepta formira se s obzirom na snagu kako pojedini odabrani element koncepta optimalno udovoljava pojedinim kriterijima, te se na taj način formira ljestvica odnosno redoslijed odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*.

Konačni rezultati ljestvice odabranih elemenata koncepta od optimalnog prema manje optimalnim u formi redoslijeda implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* prikazani su u tablici 4.6 redoslijedom kako slijedi:

Tablica 4.6 Redoslijed implementacije elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*

Redoslijed implementacije odabranih elemenata koncepta	Ukupni prioritet odabranog elementa koncepta P_i	Odabrani element koncepta <i>Brodogradnja 4.0</i>
1.	$P_3 = 0,0787$	Digitalni blizanac (<i>DT</i>)
2.	$P_{14} = 0,0732$	Progresivno RFID povezivanje (<i>PI</i>)
3.	$P_9 = 0,0730$	Modeliranje i simuliranje proizvoda i procesa (<i>MSP</i>)
4.	$P_1 = 0,0674$	Internet stvari (<i>IoT</i>)
5.	$P_6 = 0,0661$	Virtualna i proširena stvarnost (<i>AR/VR</i>)
6.	$P_{15} = 0,0630$	Kibernetika sigurnost (<i>CS</i>)
7.	$P_2 = 0,0591$	Kibernetika - fizički sustavi (<i>CPS</i>)
8.	$P_{10} = 0,0532$	Robotska automatizacija procesa (<i>RPA</i>)
9.	$P_5 = 0,0469$	Velika baza podataka (<i>BD</i>)
10.	$P_{12} = 0,0456$	Pametno napredno planiranje u vremenu (<i>SRP</i>)
11.	$P_4 = 0,0431$	Kibernetika sigurnost (<i>CS</i>)
12.	$P_8 = 0,0421$	Autonomni transport (<i>AVS</i>)
13.	$P_{11} = 0,0419$	Fleksibilnost proizvodnog procesa (<i>PPF</i>)
14.	$P_{20} = 0,0408$	Integrirana nabava (<i>ISC</i>)
15.	$P_{19} = 0,0402$	Sustav samooptimizacije (<i>SS</i>)
16.	$P_{13} = 0,0401$	Automatizacija i robotizacija procesa skladištenja (<i>WAR</i>)
17.	$P_7 = 0,0382$	Aditivna proizvodnja (<i>AM</i>)
18.	$P_{17} = 0,0334$	Prediktivna analitika (<i>PA</i>)
19.	$P_{16} = 0,0309$	Prediktivno održavanje (<i>PM</i>)
20.	$P_{18} = 0,0231$	Podrška donošenju odluka (<i>DMS</i>)

4.7. FAZA 3 - Utvrđivanje stabilnosti odabranog rješenja

Stabilnost odabranog projektnog rješenja, postupka implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, formiranje rang ljestvice utvrđuje se u fazi 3 predložene metodologije provođenjem analize osjetljivosti.

Zanimljivost *AHP* procesa je da ova metoda dopušta nedosljednosti u usporedbi. Nejasnoće koje uvodi ova fleksibilnost povećavaju potrebu za analizom osjetljivosti. Usporedba odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, prema izabranim kriterijima 1 do 5, može se procijeniti poštujući ljestvicu ocjene bliskosti kako je opisano u prethodnom poglavlju. Bilo koji poremećaj odabranog implementacijskog rješenja utječe na standardni proizvodni postupak.

Pošto se u ovoj fazi treba analizirati veliki broj odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* uspoređujući se prema svakom od kriterija, koristi se računalni program *AHP Expert Choice software* [81].

Analiza osjetljivosti kao dio programa *Expert Choice* izvršena je kako bi se utvrdilo da li navedeni redoslijed implementacije odabranih elemenata koncepta može biti drugačiji kada bi se prioriteti prema postavljenim kriterijima mijenjali u određenim granicama.

Analiza osjetljivosti (*eng. Sensitivity Analysis, SA*) jedan je od najjednostavnijih postupaka kojim se prevladavaju nesigurnosti i rizik u odlučivanju. Koristi se za provjeru stabilnosti rezultata odlučivanja, odnosno rangiranja odabranih elemenata koncepta. Proces analiziranja definira u kojoj mjeri je moguća promjena vrijednosti ulaznih varijabli modela i na koji način one utječu na izlazne vrijednosti.

Analiza osjetljivosti temeljena je na metodologiji operacijskih istraživanja linearnog programiranja, te omogućuje analiziranje parametara modela i utječe na optimalno rješenje unutar linearnog programiranja [81, 82].

Fleksibilnost je važan segment analize osjetljivosti.

Analizu osjetljivosti moguće je opisati na četiri načina:

- Dinamički (*eng. Dynamic*),
- Izvedbeni (*eng. Performance*),
- Gradijentni (*eng. Gradient*),
- Cilj-cilj (*eng. Head-to-Head*).

Svaki od grafičkih prikazivanja omogućuje različite performanse analize osjetljivosti. Za donositelja odluka može biti korisno imati razinu indikacije osjetljivosti, promjenama odabranih elemenata koncepta s obzirom na izmjenu jedne ili više varijabli.

Općenito postoje dvije vrste analize osjetljivosti [81]:

- Analitička analiza osjetljivosti, za uporabu kod dobro definiranih sustava i rješavanje problema pomoću djelomične derivacije prikazane u jednadžbi (11).

$$S_x^F = \partial F / \partial x \quad (11)$$

gdje je S_x funkcija osjetljivosti koja prati intenzitet promjene ciljne funkcije F u ovisnosti o promjenama parametra x .

- Empirijska analiza osjetljivosti, koristi se za eksperimentalno definiranje parametara varijacije na temelju optimalnog rješenja.

Prema formiranoj ljestvici prioriteta od P_1 do P_{20} predloženi redoslijed od najviše vrijednosti prema najnižoj je optimalni redoslijed.

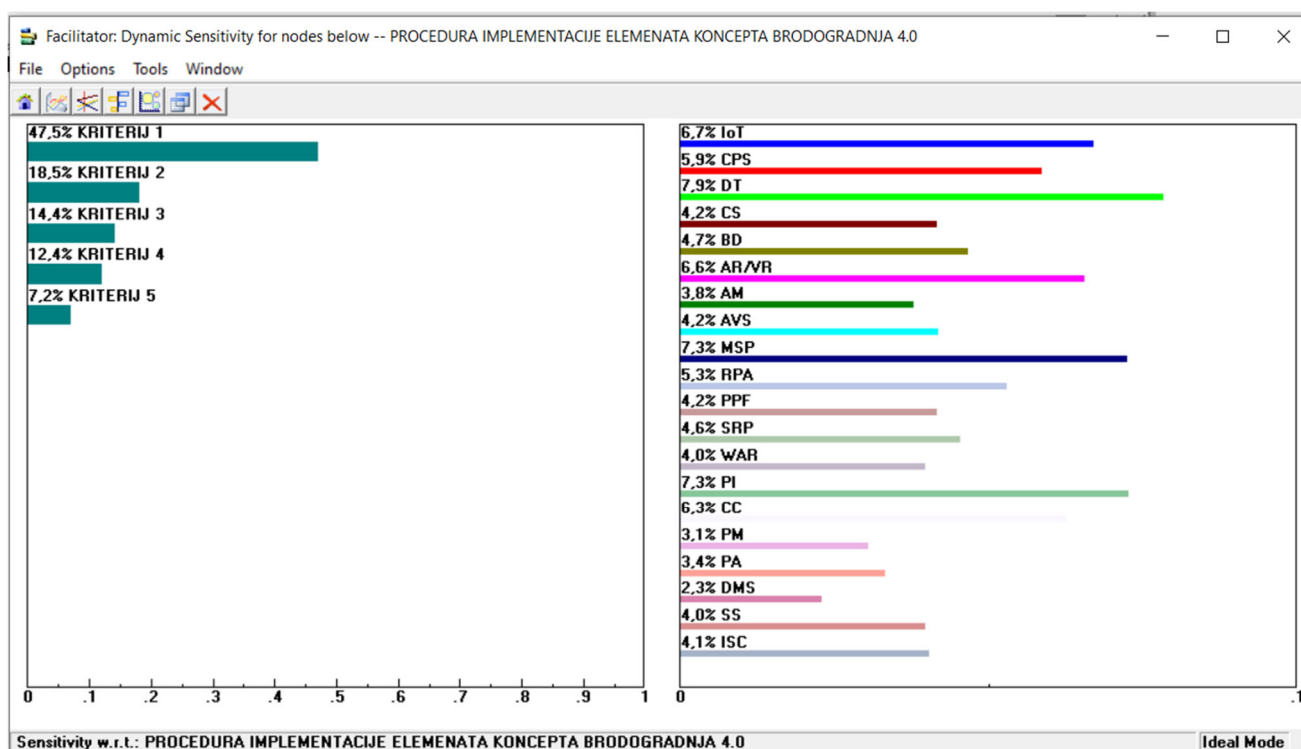
Empirijska analiza osjetljivosti za predložene različite kombinacije ulaznih podataka sugerira rang ljestvicu stabilnih predloženih rješenja.

4.7.1 Dinamička analiza osjetljivosti (*eng. Dynamic Sensitivity Analysis*)

Dinamička analiza osjetljivosti (*eng. Dynamic Sensitivity Analysis*) omogućuje kreiranje izmjene ljestvica kriterija i ljestvice odabranih elemenata koncepta direktno na dijagramu (na ekranu), čime se prati izmjena rangiranja kriterija i elemenata koncepta. Dinamičkim povećanjem kriterija na zaslonu uočava se izmjena po prioritetima elemenata koncepta. Provjera stabilnosti odabranog rješenja izvršila se dinamičkim povećanjem i smanjenjem po prioritetnosti kriterija i svakog pojedinog elementa koncepta *Brodogradnja 4.0*.

Provjerom dinamičke analize osjetljivosti izvršena je provjera stabilnosti na način da se variranjem važnosti pojedinih kriterija za 5% u svim kombinacijama nije došlo do značajne promjene ljestvice redoslijeda implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*. Ne uočavaju se značajne promjene redoslijeda, te se može konstatirati da je rezultat analize stabilan, odnosno postupak implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* smatra se stabilnom.

Grafički prikaz dinamičke osjetljivosti izvedbenog modela prikazan je na slici 4.7.



Slika 4.7 Dinamička analiza osjetljivosti [AHP Expert Choice software]

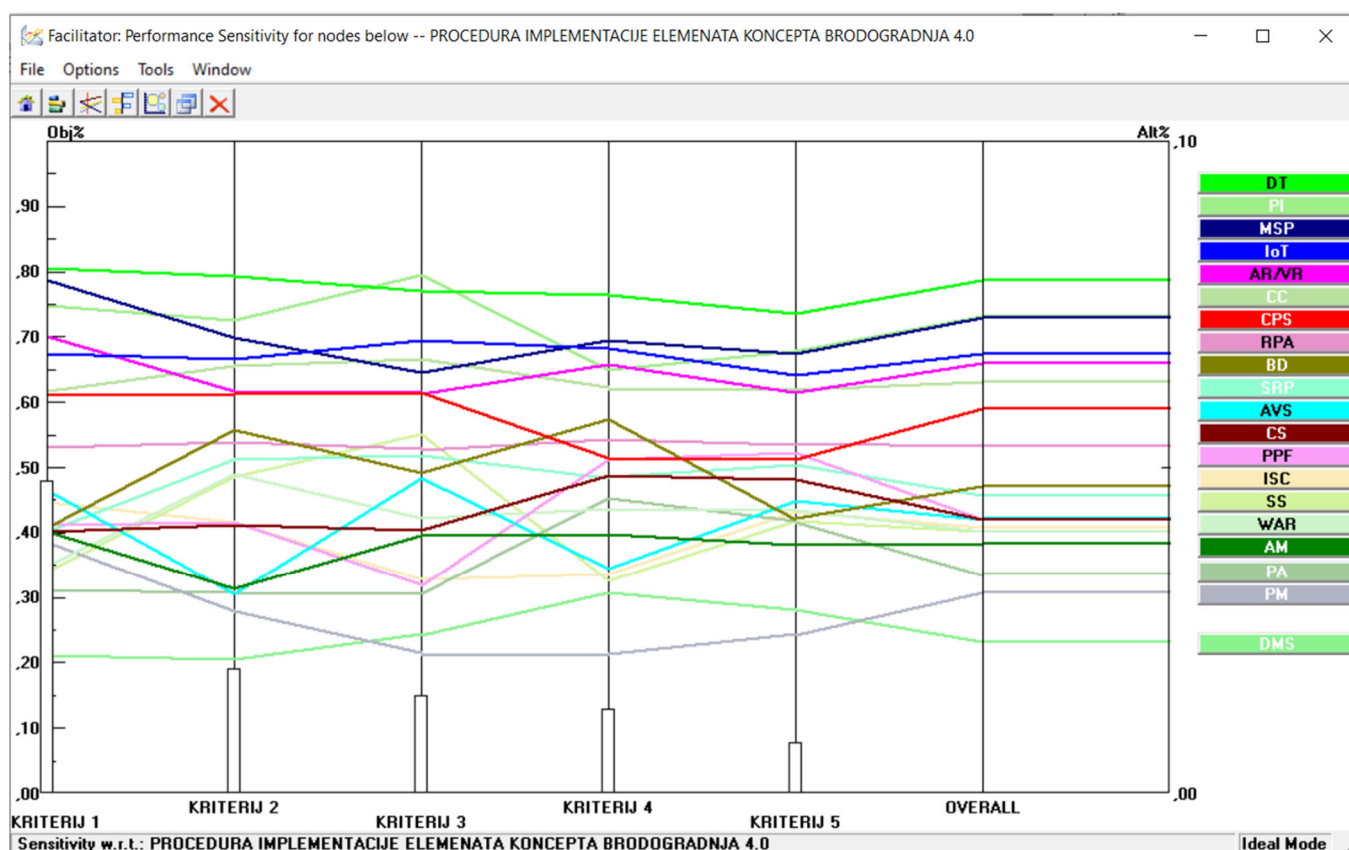
4.7.2 Analiza izvedbene osjetljivosti (eng. *Performance Sensitivity Analysis*)

Analiza izvedbene osjetljivosti (eng. *Performance Sensitivity Analysis*) grafički prikazuje način kako su odabrani elementi koncepta rangirani prema kriterijima.

Jednostavnim pomicanjem kriterija pomiče se njegova važnost, no istovremeno se smanjuje važnost drugog kriterija, te se na taj način dobivaju različiti rezultati, mijenjanjem rangiranja pojedinog kriterija promatra se izmjena ljestvice prioritetnosti pojedinih odabranih elemenata koncepta. Na osi x vidljivi su kriteriji korišteni u modelu, na osi y s desne strane vide se rezultati svih analiziranih odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*. Zbroj svih stavki je 1 u skladu s AHP metodologijom. Pojmovi kriterija imenovani su neposredno ispod cilja. Lijeva y os predstavlja relativni prioritet svakog kriterija.

Desna x - os predstavlja ukupni prioritet svakog elementa koncepta, dok su okomite linije relativni prioriteti svakog kriterija.

Izlazni rezultat za bilo koju kombinaciju može se istovremeno gledati. Dijagram na slici 4.8 ilustrira grafičko sučelje analize izvedbene osjetljivosti (*Performance*).



Slika 4.8 Analiza izvedbene osjetljivosti (*Performance*) [AHP Expert Choice software]

Analizom rezultata može se pratiti odnos pojedinog elementa koncepta s obzirom na svaki od navedenih 5 kriterija za koje se razmatrala usporedba.

Optimalni redoslijed prati redoslijed implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, gdje se započinje s elementom digitalni blizanac (eng. *Digital Twin*, *DT*) označen svijetlo zelenom bojom. Na temelju analize svih kriterija ovaj element se nalazi na prvom mjestu razmatrajući dijagram s desna na lijevo. Analizirajući elemente koncepta nadalje prema lijevoj strani, slijedi element koncepta progresivno RFID povezivanje (eng. *Progressive RFID interconnectivity*, *PI*), potom modeliranje i simuliranje proizvoda i procesa (eng. *Modelling & Simulation of Production Processes*, *MSP*), pa sve redom do posljednjeg podrška donošenju odluka (engl. *Decision Making Support*, *DMS*).

U dijagramu se uočava da odabrani element koncepta progresivno RFID povezivanje prema kriteriju 3 (povećanje kvalitete) ima najvišu vrijednost.

Rangiranje ljestvice prioriteta postupka implementacije odabranih elemenata koncepta prema hijerarhiji posloženo je na desnoj strani priložene slike.

4.7.3 Analiza dijagramom stupnja osjetljivosti (eng. *Gradient Sensitivity Analysis*)

Dijagram stupnja osjetljivosti (eng. *Gradient Sensitivity Analysis*) omogućuje uvid u prioritete odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* u odnosu na pojedini odabrani kriterij. Grafički prikaz ove analize osjetljivosti omogućuje uvid u kojim intervalima vrijednosti prioriteta kriterija dominiraju u određenom intervalu dominantnog odabranog elementa koncepta.

Na slikama u Priritku br. 3 ovog rada prikazane su:

- analiza dijagramom stupnja osjetljivosti (*Gradient*) odabranih elemenata koncepta prema kriteriju 1: *cijena investicije*,
- analiza dijagramom stupnja osjetljivosti (*Gradient*) odabranih elemenata koncepta prema kriteriju 2: *povećanje produktivnosti*,
- analiza dijagramom stupnja osjetljivosti (*Gradient*) odabranih elemenata koncepta prema kriteriju 3: *povećanje kvalitete*,
- analiza dijagramom stupnja osjetljivosti (*Gradient*) odabranih elemenata koncepta prema kriteriju 4: *vremenski period implementacije*,
- analiza dijagramom stupnja osjetljivosti (*Gradient*) odabranih elemenata koncepta prema kriteriju 5: *složenost implementacije*.

Na navedenim dijagramima redoslijed odabranih elemenata koncepta mijenja se s porastom važnosti odabranog kriterija. Metodologija primjene analize osjetljivosti (*Gradient*) služi i kao provjera stabilnosti modela, te se postupak smatra stabilnim ukoliko se mijenjanjem važnosti pojedinog kriterija za 5% u različitim scenarijima ne pojave značajne razlike u redoslijedu implementacije odabranim elementom koncepta *Brodogradnja 4.0*.

Može se uočiti da odabrani element koncepta DT (*digitalni blizanac*) optimalno zadovoljava prema kriteriju 1 (*cijena investicije*) i predlaže se ovim elementom započeti postupak implementacije koncepta *Brodogradnja 4.0*.

Nadalje prema kriteriju 2 (*povećanje produktivnosti*), uočava se da najviše rangirani odabrani element koncepta DT (*digitalni blizanac*) optimalno zadovoljava rješenjem te se smatra da s njim započinja implementacijski proces odabranih elemenata koncepta i on ima prednost za svaku drugu vrijednost prioriteta tog kriterija u intervalu od 0 do 1.

Prema kriteriju 3 (*povećanje kvalitete*), uočava se da je implementacijski proces optimalno započeti s elementom DT (*digitalni blizanac*), koji zadovoljava predloženo projektno rješenje redoslijeda i u odnosu na ostale elemente koncepta. Redoslijed odabranih elemenata koncepta nešto je izmijenjen no ne značajno (unutar dozvoljenih 5%) te se smatra stabilnim rješenjem.

Prema kriteriju 4 (*vremenski period implementacije*) i kriteriju 5 (*složenost implementacije*), na priloženim dijagramima uočava se da je implementacijski proces optimalno započeti s odabranim elementom koncepta DT (*digitalni blizanac*). Redoslijedi ostalih elemenata koncepta djelomično se razlikuju prema prioritetima pojedinih kriterija, što je također vidljivo iz priloženih dijagrama no bez značajnih odstupanja u ukupnom redoslijedu.

4.7.4 Analiza dijagramom sučeljavanja (*Head-to-Head*)

Izvršena je i analiza dijagramom sučeljavanja (*eng. Head-to-Head*), gdje se odabrani elementi koncepta međusobno uspoređuju s obzirom na svaki pojedinačni odabrani kriterij, te je vidljiv i odnos u postocima koliko je jedan element dominantan odnosu na drugi.

Na slikama u Privitku br.3 ovog rada, prikazane su usporedbe analizom dijagramom sučeljavanja, gdje se kao primjer uspoređuje odabrani element koncepta DT (*digitalni blizanac*) prema svim ostalim odabranim elementima koncepta pojedinačno kako bi se prikazala prioritarna važnost na strani ovog elementa.

Na isti način se uspoređuju svi ostali odabrani elementi koncepta međusobno, te se temeljem toga formira rang ljestvica prioriteta postupka implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*.

4.8 Prikaz postupka za osnivanje metodologije implementacije koncepta *Brodogradnja 4.0*

Kao zaključak faze 3 istraživanja, provođenjem analize osjetljivosti predložene metodologije za implementaciju odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*, potvrđena je stabilnost dobivenih rezultata; predstavljen je optimalni postupak implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*; dobiveni rezultati analize su stabilni i konačni.

Prikazani rezultati predstavljeni su kao ljestvica prema prioritetima odnosno kao rang ljestvica optimalnog redoslijeda implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* u tablici 4.7.

Predstavljeni redoslijed započinje s implementacijom odabranog elementa koncepta *digitalni blizanac* (eng. *Digital Twin, DT*), potom progresivno RFID povezivanje (eng. *Progressive RFID Inteconnectivity, PI*), potom modeliranje i simuliranje proizvoda i procesa (eng. *Modeling & Simulation of production processes, MSP*), te nadalje sve do posljednjeg koji najmanje optimalno zadovoljava predstavljene kriterije, *podrška donošenju odluka* (eng. *Decision Making Support, DMS*).

Uporište ovog dijela istraživanja predstavljeno je kroz izrađenu i obrađenu relevantnu anketu međunarodnih brodograđevnih stručnjaka, te nadalje provjereno primjenom prilagođenog alata analitičkog hijerarhijskog procesa (*AHP*) i potvrđeno primjenom analize osjetljivosti.

Tablica 4.7 Redoslijed implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*

Red. Br.	Odabrani element koncepta <i>Brodogradnja 4.0</i>	Ukupni prioritet odabranog elementa koncepta EK_i
1.	EK_3 - Digitalni blizanač (<i>DT</i>)	0,0787
2.	EK_{14} - Progresivno RFID povezivanje (<i>PI</i>)	0,0732
3.	EK_9 - Modeliranje i simuliranje proizvoda i procesa (<i>MSP</i>)	0,0730
4.	EK_1 - Internet stvari (<i>IoT</i>)	0,0674
5.	EK_6 - Virtualna i proširena stvarnost (<i>AR/VR</i>)	0,0661
6.	EK_{15} - Kibernetika sigurnost (<i>CS</i>)	0,0630
7.	EK_2 - Kibernetika - fizički sustavi (<i>CPS</i>)	0,0591
8.	EK_{10} - Robotska automatizacija procesa (<i>RPA</i>)	0,0532
9.	EK_5 - Velika baza podataka (<i>BD</i>)	0,0469
10.	EK_{12} - Pametno napredno planiranje u vremenu (<i>SRP</i>)	0,0456
11.	EK_4 - Kibernetika sigurnost (<i>CS</i>)	0,0431
12.	EK_8 - Autonomni transport (<i>AVS</i>)	0,0421
13.	EK_{11} - Fleksibilnost proizvodnog procesa (<i>PPF</i>)	0,0419
14.	EK_{20} - Integrirana nabava (<i>ISC</i>)	0,0408
15.	EK_{19} - Sustav samooptimizacije (<i>SS</i>)	0,0402
16.	EK_{13} - Automatizacija i robotizacija procesa skladištenja (<i>WAR</i>)	0,0401
17.	EK_7 - Aditivna proizvodnja (<i>AM</i>)	0,0382
18.	EK_{17} - Prediktivna analitika (<i>PA</i>)	0,0334
19.	EK_{16} - Prediktivno održavanje (<i>PM</i>)	0,0309
20.	EK_{18} - Podrška donošenju odluka (<i>DMS</i>)	0,0231

5. PROVJERA PREDLOŽENE METODOLOGIJE NA PRIMJERU BRODOGRADILIŠTA PRIMJENOM SIMULACIJSKOG MODELIRANJA

5.1 Uvod

Prilikom analiziranja studije slučaja na primjeru brodogradilišta, potrebno je voditi računa o ograničenjima raspoloživih resursa, dostupne tehnologije i zaposlenika, pa je brzina u obradi podataka jako važna. Predložena metodologija primijenjena je za rješavanje realnog problema na primjeru realnog brodogradilišta srednje veličine koje želi s postojeće industrijske razine 2.8 doseći najvišu tehnološku razinu *Brodogradilište 4.0*.

Simulacijsko modeliranje (*eng. Simulation Modeling*) danas je postalo nezaobilazni alat koji koristi veliki broj brodogradilišta kako bi se predvidjeli i analizirali svi koraci u proizvodnom procesu i prije ugovaranja samog projekta [83, 84, 88].

Računalni program koji će se koristiti za metodu simulacijskog modeliranja je *Technomatic Plant Simulation*; alat je namijenjen za rješavanje problema i uspostavljanje korektivnih aktivnosti na primjeru uočenih problema. Izuzetno je učinkovit alat za dinamičku simulaciju i stvaranje digitalnih modela proizvodnih i logističkih sustava, te ispitivanje karakteristika sustava i optimizaciju njihove funkcionalnosti [85, 86, 87, 88].

Simulacijski model relativno je vjeran prikaz realnog procesa:

- Simulacijskim modeliranjem moguće je uočavanje "*uskih grla*" na modelu prije nego se ona dogode u stvarnom procesu;
- Simulacijsko modeliranje može se koristiti za eksperimentiranje sa različitim inačicama novih projektnih rješenja (what-if scenariji), prije konačne odluke o tome u što će se investirati i bez zadiranja u stvarni proces;
- Simulacijsko modeliranje se može koristiti za verifikaciju predloženih rješenja nekog problema u proizvodnji ili za eksperimentiranje sa nekim kritičnim elementima u njihovom kritičnom području rada [88, 89].

U ovom poglavlju prikazat će se primjena simulacijskog modeliranja za unaprjeđenje brodograđevnog procesa na primjeru implementacije jednog od odabranih elemenata koncepta; na primjeru panel linije u stvarnom brodogradilištu. Naime analiza implementacije svih odabranih elemenata koncepta iziskivala bi obradu velike količine podataka koja premašuje obim ovog rada, te će se razvijati u slijedećim istraživanjima.

Dosadašnjim istraživanjem o primjeni odabranih elemenata koncepta uočava se da nedostaje sustavni pristup prema implementaciji digitalnih tehnologija na proizvodni proces. Naime, brodogradilišta i pomorske organizacije trenutno intenzivno rade na prelasku na integrirano podatkovno okruženje jer će samo na taj način stvoriti preduvjete za sigurnost i održivost projekta odnosno izgradnju, projektiranje i eksploataciju broda u svim fazama (cjeloživotno) u danas sve više digitaliziranom sektoru [9, 34, 35, 36, 39, 54, 65].

Svrha analize je povećanje efikasnosti dijela proizvodnje za koje se iskustvenom metodom procijenilo da se nalazi na razini industrije 2.8.

Osnovna struktura osmišljene metodologije ovog dijela istraživanja prikazana je na slici 5.1.

Predložena metodologija za unaprjeđenje dijela proizvodnog procesa zasniva se na provođenju točnog postupka koji se sastoji od pet faza kroz koje se dolazi do rješenja.

U *prvoj fazi* definiraju se problemi i opisuje postojeće stanje, te se definiraju ciljevi projekta implementacije odabranog elemenata koncepta.

U *drugoj fazi* definiraju se ulazni podaci i idejno osmišljava simulacijski model.

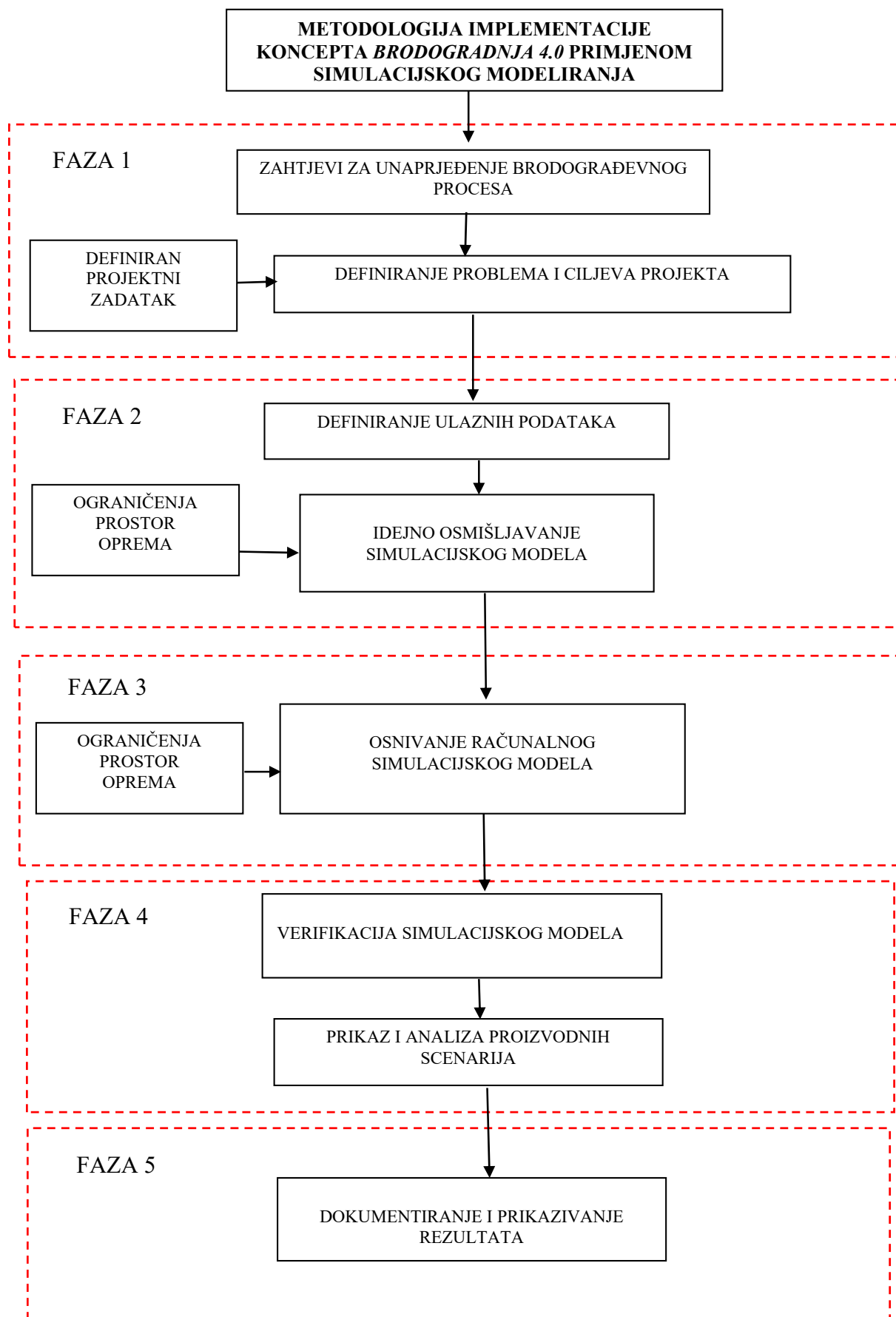
U *trećoj fazi* primjenom metoda ili alata, uzimajući u obzir ograničenja i tehničke značajke linije, osniva se računalni simulacijski model.

U *četvrtoj fazi* vrši se verifikacija simulacijskog modela i analiziraju proizvodni scenariji, te razmatraju mogućnosti unaprjeđenja simulacijskog modela.

U posljednjoj *petoj fazi* dokumentiraju se rezultati i prikazuje implementacija.

Osnovni cilj primjene simulacijskog modeliranja za projektiranje dijela proizvodnog procesa jest mogućnost ispitivanja održivosti i izvedivosti mnogobrojnih kombinacija rasporeda segmenata procesa, ispitivanje parametara strojeva i uređaja, opisivanje različitih stanja skladištenja materijala i opreme i razmatranje investicija u vrlo ranoj fazi razvoja projekta [91, 92, 93].

Predložena metodologija primijenjena je pri rješavanju realnog problema na primjeru brodogradilišta srednje veličine, gdje analizirani tehnološki projekt predlaže modernizaciju proizvodnog procesa primjenom odabranog elementa koncepta *Brodogradnja 4.0* na proizvodnoj liniji panela u sklopu brodoobradne radionice.



Slika 5.1 Osnovna struktura predložene metodologije

Prilikom razvoja automatiziranog simulacijskog modela potrebno je uspostaviti tri strukturne komponente:

- Model s bazom podataka definiranom na osnovu informacija prikupljenih u brodograđevnom procesu,
- Grafička podloga za simulacijsko upravljanje i za simulacijsko modeliranje s točkama u kojima se donosi odluka za prikupljanje podataka,
- Sustav sučelja za nadzor simulacijskog softvera i obradu prikupljenih podataka.

Na računalnom modelu linije simulira se promatrana linija panela, želi se utvrditi pojava uskih grla, razmotriti optimalni parametri linije, definirati kapacitete i dimenzije pojedinih resursa linije, a sve u okviru projektnih ograničenja i ciljeva projekta modernizacije radionice kao sastavnog dijela brodograđevnog proizvodnog procesa.

5.2 FAZA 1 - Zahtjevi za unaprjeđenje proizvodnog procesa

Temeljem prijedloga za implementaciju potrebno je napraviti usporedbu trenutnog stanja s idealnim (*Brodogradnja 4.0*) odnosno definirati ga.

Treba utvrditi koliko je brodogradilište spremno za implementacijski proces, što može poslužiti i za usporedbu s ostalim tvrtkama iz brodograđevne industrije kao usporedba prilikom traženja segmenata gdje su moguća poboljšanja.

Za provedbu posloženog postupka implementacije odabranih elemenata koncepta korištenjem simulacijskog modeliranja odabran je primjer brodogradilišta srednje veličine, koje unutar svog poslovanja ima sve segmente tipičnog brodograđevnog procesa; projektiranje, nabava, skladištenje, panel linija, linija izrade sekcija, mjesto za montažu broda i dio opremne obale za završne radove opremanja broda.

Brodogradilište se nalazi na razini industrijskog razvoja 2.8, upoznato je s konceptom *Brodogradnja 4.0* te ima tendenciju implementacije odabranih elemenata koncepta radi postizanja automatizacije i digitalizacije svog poslovanja.

Implementacija nekog od odabranih elemenata koncepta u radionici s panel linijom znači povećanje proizvodnosti, ubrzanje tehnološkog procesa i uspostava kontrole nad prijenosom i razmjenom podataka, informacija i materijala.

Modernizacija radionice je nužna kako bi bila na visokoj tehnološkoj razini i bila u stanju prihvatiti i na vrijeme obraditi kompletnu planiranu proizvodnju.

Primjena nekog od odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* u dosadašnjim istraživanjima uglavnom je opisana kroz primjenu digitalnog blizanca u projektiranju, dok je segment proizvodnje vrlo malo, gotovo vrlo malo zastupljen [87, 88, 89, 90].

5.3. Definiranje problema i prikaz postojećeg stanja

Metodologija se predstavlja na primjeru postupka implementacije u brodogradilištu na primjeru rješavanja realnog problema.

Kod tehnološke modernizacije postojećeg brodogradilišta potrebno je razmotriti niz ograničenja koja direktno utječu na donošenje odluka prilikom implementacije nekog od odabranih elemenata koncepta [94, 95, 96, 97, 98].

Upravljanje brodograđevnim proizvodnim procesom zahtijeva generiranje velike količine podataka. U ovako složenom procesu postoji stalna potreba za prikupljanjem i analiziranjem podataka. U analiziranom brodogradilištu tehnološki proces tijeka materijala uglavnom prati suvremene tehnološke tokove, od procesa rezanja limova i profila, potom pjeskarenja limova i profila, izrada panela, zavarivanje strukturnih elemenata, pa sve do simultane proizvodnje blokova trupa. U istoj radionici u blokove se ugrađuju elementi opreme, izvršavaju se svi zavarivački radovi na strukturi trupa.

Postojeći analizirani proizvodni proces za izradu ukrijepljenih panela raspolaže zastarjelom tehnologijom, događaju se greške u dostavi materijala, netočnosti u procesu, te čekanja materijala uslijed nesljedivosti praćenja prispjeća materijala i neadekvatnog označavanja segmenata poglavito u međuprocima i međuskladištima. Materijal stoji predugo na međuskladištima zbog niza grešaka u preciznom praćenju ulaznog asortimana limova i profila, tako i asortimana koji se treba ugraditi u blokove trupa.

U odnosu na postojeći proces primjenom nekog od odabranih elemenata koncepta očekuje se:

- Skraćenje vremena potrebnog za izradu ukrijepljenih panela,
- Skraćenje vremena za prikupljanje i obradu podataka o izvršenim radnim procesima,
- Skraćenje vremena boravka materijala na međuskladištima,

- Izbjegavanje nepotrebnih transportnih aktivnosti,
- Smanjenje utroška radnih sati na pojedinim aktivnostima,
- Povećanje produktivnosti proizvodne linije,
- Povećanje kvalitete izrađenih elemenata trupa,
- Optimizacija korištenja resursa, kako dokumentacijom tako i materijalom.

5.4. Definiranje ciljeva projekta primjene simulacijskog modeliranja

Cilj primjene simulacijskog modeliranja prema digitaliziranom proizvodnom procesu jest u vrlo ranoj fazi izvršiti simulaciju izrade odabrane skupine materijala trupa broda, točnije definiranje proizvodnih vremena, uočavanje uskih grla, te dati prijedlog kako ubrzati proces korištenjem senzoriranog sustava praćenja tijeka procesa. Simulacijskim modelom proizvodnje za odabranu skupinu materijala grupa nadgrađa, a na osnovu prikupljenih tehničkih parametara, želi se analizirati postojeći proces, te potom predložiti poboljšanja kako bi predloženo projektno rješenje i smjernice zadovoljenja projektnog zahtjeva podigle kvalitetu i brzinu parametara linije. Od modela se očekuje da posluži ne samo kao potpora projektiranju unaprijeđenja postojećeg proizvodnog procesa, nego i da predstavlja temelje modela kojim će se unaprijediti planiranje, kontrola i daljnja modernizacija ostatka proizvodnog procesa.

Planirane aktivnosti izmjena u procesu:

Cilj 1:

- vrijeme trajanja izrade odabrane skupine materijala za grupe nadgrađa skratiti,
- analizom utvrditi uzročnike neispunjenja cilja i eventualne kritične točke dotoka materijala i njihovu propusnost u tehnološkom procesu,
- skraćanje vremena prikupljanja podataka sa pojedinih radnih mjesta.

Cilj 2: analiziranjem procesa sortiranja strukturnih elemenata simulacijom tehnološkog procesa i mjesta sortiranja, sugerirati pozicioniranje stavljanja komponenata za praćenje sortiranja materijala, transporta materijala i dostave do radnog mjesta s aktivnom uporabom digitalnih tehnologija *Brodogradnje 4.0*.

Cilj 3: Opisati predloženu metodologiju i tehnologiju prikupljanja podataka kao podlogu za eventualno daljnje istraživanje.

Simulacijskim modelom želi se kroz analizu osmišljenog projekta utvrditi željene parametre linije za izradu ukrijepljenih panela prema kapacitetima, resursima, uzimajući u obzir projektne ciljeve i ograničenja.

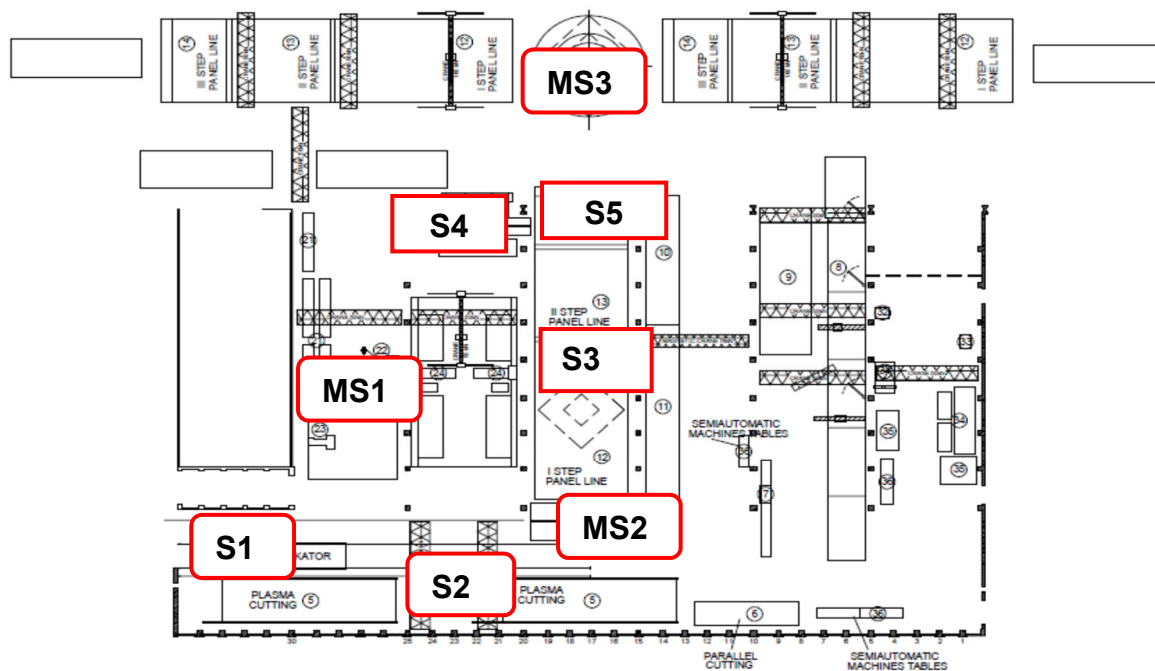
Na osnovu izvršene analize definirali bi se zaključci i sugerirale modifikacije sve u cilju unaprjeđenja proizvodnog procesa i propusnosti segmenata trupa kroz brodograđevni tehnološki proces.

5.5 FAZA 2 - Definiranje ulaznih podataka i osmišljavanje modela

Prilikom kreiranja simulacijskog modela koriste se samo relevantni podaci za primjenu projektnog rješenja odnosno ostvarenje cilja irelevantni podaci za koje se procjenjuje da direktno ne participiraju u implementacijskom procesu ne uzimaju se u razmatranje. Prikupljeni podaci u osnivačkoj fazi modernizacije proizvodne linije služe kao osnova za početak modeliranja.

5.5.1 Prikaz tehnološkog procesa proizvodne radionice

Na slici 5.2 prikazan je tlocrt proizvodne radionice.



Slika 5.2 Tlocrt radionice za izradu ukrijepljenih panela

Prikazan je tlocrt radionice površine cca 300m², sastoji se od niza strojeva i uređaja, no ovdje će biti navedeni oni koji su relevantni za istraživanje i analizu:

- Strojevi za rezanje profila (S1),
- Strojevi za rezanje limova (S2),
- Međuskladište i dohvatna linija profila za liniju panela (MS1)
- Međuskladište za liniju panela (MS2),
- Linija izrade ukrijepljenih ravnih panela (S3),
- Linija za pozicioniranje i zavarivanje profila (S4),
- Završetak linije panela (S5),
- Međuskladište i okretni stol za izradu ravnih blokova trupa (MS3).

Za simulaciju formiranja pametne radionice 4.0 koristit će se podaci o rezultatima prikupljeni korištenjem digitalnih tehnologija u sličnim proizvodnim procesima [56, 99, 100, 101].

Za radionicu je važno povezivanje ulaznih i izlaznih podataka koji sadrže sve relevantne informacije potrebne operaterima.

Prikupljanje podataka određuje se za procese:

- Brzine rezanja limova i profila (uključujući namještanje, označavanje, prijenos),
- Brzine zavarivanja limova i profila (uključujući namještanje, označavanje,

prijenos),

- Dimenzije strojeva i uređaja koji sudjeluju u tehnološkom procesu radionice,
- Međusobna udaljenost strojeva i uređaja koji sudjeluju u procesu,
- Broj međuskladišta i njihove dimenzije i kapacitet,
- Raspoloživi ljudski resursi i potrebni ljudski resursi,
- Raspoložive tehnologije i potrebne tehnologije za odvijanje tehnološkog procesa.

Transportne aktivnosti:

- Dizalice; njihove dimenzije, kapacitet i brzina rukovanja s teretom,
- Horizontalni transport; dimenzije, kapacitet i brzina rukovanja teretom,
- Transporteri; dimenzije, kapacitet i brzina rukovanja s teretom,
- Doprema materijala i način međutransporta materijala unutar radionice.

5.5.2 Osnovne značajke tehnološkog procesa u radionici

Nakon skladištenja limova i profila odvija se proces pjeskarenja i korozivne zaštite. Podnim transporterom limovi i profili stižu na strojeve za rezanje profila (S1), pa potom i strojeve za rezanje limova (S2). Nakon međuskladišta (MS2) transporterom limovi odlaze na liniju za zavarivanje limova na panel liniji, dok se profili s međuskladišta (MS1) usmjeravaju prema mjestu zavarivanja profila na panele.

Sa linije za pozicioniranje i zavarivanje profila (S4), profili se usmjeravaju na liniju za izradu ukrijepljenih panela (S3). Nakon završetka zavarivanja ukrijepljenih panela (S5) i nakon međuskladištenja (MS3) odlaze na slijedeći takt tehnološkog procesa.

Tehnološki proces tijeka materijala fizički je povezan, osigurana je komunikacija između pojedinih proizvodnih tokova, kao i dotok materijala na svako radno mjesto.

Limovi u radionici transportiraju se magnetnom mosnom dizalicom i podnim valjčastim transporterima, dok se profili transportiraju u transportnim paletama ili dizalicom.

Limovi se na panel liniju transportiraju podnim valjčastim transporterom, koji je ujedno i podloga na liniji zavarivanja limova. Profili se na panele zavaruju dvoosnim strojem za kutno zavarivanjem.

5.5.3 Tehničke karakteristike linije za simulacijski model

Tehničke karakteristike strojeva i uređaja definirani prema tehničkoj dokumentaciji te prikupljeni prema uređajima sličnih karakteristika.

Tablica 5.1 Tehničke karakteristike strojeva za rezanje

Dvije rezne glave sa mogućnošću nagibanja glave	+/- 40°
Plazma plin	N ₂ dušik ili O ₂ kisik
Širina za paralelno i zrcalno rezanje	2 x 3000 mm
Dužina rezanja	2 x 13000 mm
Debljina lima	4 ÷ 30 mm
Max dimenzija lima	14000 x 3000 mm
Priprema ruba	I ili V
Materijali za rezanje	Čelik, aluminij, nehrđajući čelik
Kapacitet stroja za rezanje profila R _P	R _P = 1 profil
Faktor brzine rezanja	f _V = 1

Tablica 5.2 Parametri I takta linije za izradu ravnih ukrijepljenih panela

Dužina lima	4000 ÷ 13000 mm
Širina lima	1600 x 3200 mm
Min.panel	4000 x 3200 mm
Max. panel	13 000 x 18 000 mm
Duljina valjčastog podnog transportera	L _V = 30 m
Brzina valjčastog podnog transportera	v _T = 0,4 m/s

Tablica 5.3 I okretni valjčasti transporter

zakretanje	+/- 90°
Min panel	4500 x 4500 mm
Max panel I	11 000 x 11 000 mm
Brzina valjčastog okretnog stola T _O	0.3 m/s
Brzina valjčastog okretnog stola T _O	14 s/ 90°

Tablica 5.4 II okretni valjčasti transporter

zakretanje	+/- 90°
Min panel	4500 x 4500 mm
Max panel II	13 000 x 18 000 mm
Brzina valjčastog okretnog stola T _o	0.3 m/s
Brzina valjčastog okretnog stola T _o	14 s/ 90°

Tablica 5.5 Parametri II takta linije zavarivanja ukrijepljenih panela

Tip zavarivanja: automatsko pod praškom	jednostrano
Debljina limova	4 ÷ 20mm
Priprema rubova: ≤ 10mm stični spoj ≥ 10mm stični spoj	I spoj zračnost u korjenu 3 ÷ 6 mm V spoj zračnost u korjenu 3 ÷ 4 mm
Brzina zavarivanja: za 4 mm	750 mm/min
za 20 mm	400 mm/min

Tablica 5.6 Međuskladišta

MS1	Za liniju zavarivanja profila
MS2	Za liniju zavarivanja limova
MS3	Za liniju zavarivanja poprečnih str. elemenata

Tablica 5.7 Označavanje teoretskih linija

Obilježavanje linija plinom argonom	debljina linija 1 ÷ 1,5 mm
Brzina označavanja	3000 ÷ 12000 mm/min

Tablica 5.8 Namještanje i zavarivanje profila

Raspon staze portala	16 000 mm
Visina portala	5000 mm
Brzina prenošenja profila	1 ÷ 5 m/min
Visina profila	80 ÷ 450 mm
Tip zavarivanja	Kutno pod praškom, neprekinuto, dvostrano
Brzina zavarivanja profila	30 m/h

Tablica 5.9 III okretni valjčasti transporter

zakretanje	+/- 90°
Min panel	4500 x 4500 mm
Max panel II	13 000 x 18 000 mm
Brzina valjčastog okretnog stola T_o	0.3 m/s
Brzina valjčastog okretnog stola T_o	14 s/ 90°

Napomena: prethodno navedeni podaci prema tehničkim specifikacijama dobavljača strojeva.

5.6 FAZA 3 - Osnivanje simulacijskog modela

Simulacijski model predstavlja temelj simulacijskog modeliranja i stoga se definira da će se na primjeru linije za izradu ravnih ukrijepljenih panela primijeniti koncept *progresivno RFID senzoriranje* kao snažna podrška konceptu pametnog proizvodnog procesa.

Za analizu simulacijskog procesa kao ulazni podaci koristit će se dokumentacija za izradu odabrane skupine materijala za grupe nadgrađa; sastoje se od limova, uzdužnih profila, poprečnih rebara i okvirnih rebara, koljena i traka. U razmatranje će se uzeti samo elementi koji prolaze kroz analiziranu liniju, dakle ravni limovi i profili.

Za razmatranu odabranu skupinu materijala grupe nadgrađa, na panel liniji, izrađuju se paneli sastavljeni iz limova debljina od 6 mm do 9 mm. Uzdužnjaci panela mahom su HP (*eng. Holland profili*) dimenzija 150 x 10 mm do 210 x 12 mm.

U postojećem proizvodnom procesu sljedivost strukturnih elemenata odvija se isključio vizuelnim praćenjem i ručnim zapisivanjem u dokumentaciju. Na segmentima trupa nema oznaka tako da se prilikom odvijanja tehnološkog procesa događaju greške, gubici izrezanih segmenata trupa, te se javlja potreba za povremenim dodatnim ponavljajućim transportnim aktivnostima uz zastoje, kako bi se dostavio materijal na određeno radno mjesto te kako bi se pronašli segmenti koji nedostaju i transportirali na odgovarajuće radno mjesto odnosno radnu stanicu takta proizvodnog procesa.

Pri praćenju strukturnih elemenata trupa fizički dio fokusiran je na izradu nacрта, prikupljanje relevantnih podataka, praćenje i organizaciju svih događaja tijekom navedenog procesa, razmjenu i komunikaciju među sudionicima procesa.

Registracija komponenti započinje u skladištu vizualnim pregledom dostavljenog materijala te se ručno unosi u računalo kako bi se formirala baza podataka prispjelog materijala. Za izradu simulacijskog modela koriste se podaci prikupljeni sa prethodnih projekata; to je dobra osnova za formiranje baze podataka kao podloge za izradu simulacijskog modela.

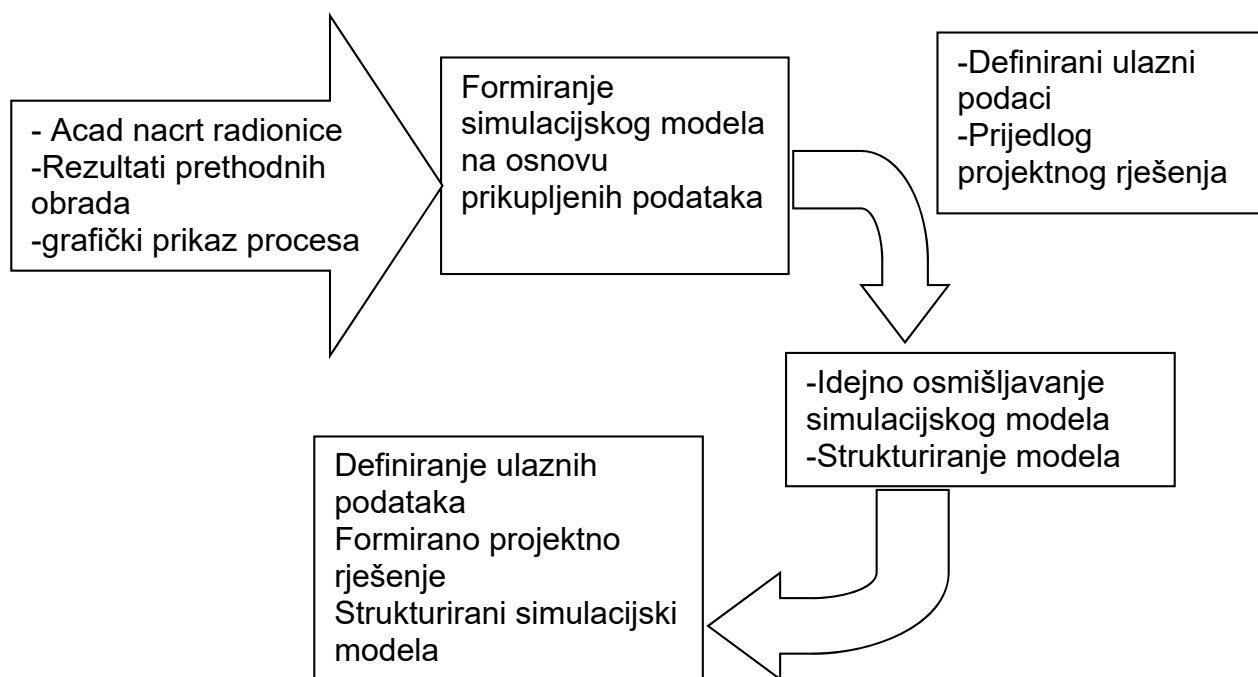
Pri formiranju modela koristit će:

- Acad nacrt radionice,
- grafički prikaz procesa,
- iskustveni podaci o obradi sa prethodnih projekata,
- simulacija u programu *Technomatic Plant Simulation softver* [91, 92].

Usporedba postojećih podataka i ciljanih rezultata mogla bi se vršiti u raznim kategorijama poput: količine obrade u jedinici vremena, usporedba transportnih vremena, vremenima međuskladištenja, vremenima zavarivanja i sl.

Ulazni podaci bili bi značajke opreme u radionici poput brzine obrade, nosivosti, vrijeme obrade.

Na slici 5.3 prikazan je dijagram toka formiranog simulacijskog modela.



Slika 5.3 Grafički prikaz toka procesa i struktura metode

Simulacijski model mora biti jednostavan, pregledan i jasan kako bi se dobio što kvalitetniji zaključak; u modelu svakom elementu dodjeljuju se određeni atributi poput brzine obrade, dimenzije elementa koji se obrađuje, načina i tijeka procesa transporta i mjesta gdje se nalazi pojedini element koji se prati.

Temeljna baza *PLM* softvera je unošenje podataka o strukturnim elementima te se potom definira logika povezanih radnih mjesta, odnosi i karakteristike svih segmenata koji čine simulacijski model. Želi se postići povezana proizvodnja tijekom procesa obrade limova i profila prema specifikaciji.

Tijekom formiranja simulacijskog modela kreiraju se specifični nositelji procesa (*eng. Object*), radna mjesta (*eng. Stations*), gdje svaka od opisanih stanica predstavlja određeni stroj za obradu strukturnih elemenata. Osnova modela su strojevi, elementi, transportni resursi, događaji i aktivnosti.

5.7 Ulazni asortiman skupine materijala za simulacijski model

Ulazni asortiman odabrane skupine materijala koja je uzeta u razmatranje za izradu simulacijskog modela sastoji se od limova i profila prema asortimanu prikazanom u Privitku br.4 rada. Analizira se izrada 98 ukrijepljenih panela, za analizu se razmatra tehnološki proces obrade 882 lima i 3000 profila. Sumirana specifikacija limova i profila dana u Privitku br. 4 rada.

Radi kvalitetnije preglednosti samog analiziranog procesa odabrana je skupina materijala sa unificiranim dimenzijama limova, različitih debljina, dok su odabrani profili duljine 12 000mm i visine 80mm kako bi se pojednostavio simulacijski model i analiza. Razmatrani segment tehnološkog procesa koji se analizira s obzirom na broj operatera po aktivnosti:

- Rezanje profila (S1), 2 operatera nadziru proces,
- Obilježavanje, obrada rubova i rezanje limova (S2), 6 operatera nadziru proces,
- Međuskladište 1 (MS1), međusortiranje profila, 2 operatera nadziru proces,
- Međuskladište 2 (MS2), međuskladištenje limova, 6 operatera nadzire proces,
- Zavarivanja panela (S3), 4 operatera nadziru proces,
- Obilježavanje i zavarivanje profila (S4), 2 operatera nadziru proces,
- Završetak panel linije (S5), 8 operatera, 8 zavarivača/popravljača.
- Međuskladište 3 (MS3), 2 operatera nadziru proces.

Ulazna datoteka za limove i profile sastoji se od slijedećih podataka:

- Vrsta limova i profila,
- Duljina limova i profila u metrima,
- Visina profila u mm,
- Debljina limova i debljina struka profila,
- Debljina glave profila,
- Definirano vrijeme rezanja,
- Definirano vrijeme zavarivanja.

Ulazna datoteka za model definirana je korištenjem prilagođenog alata u *Excel* file-u, gdje su formatirane sve potrebne informacije za izradu modela. Temeljem tako posebno prilagođene datoteke formira se ulazna datoteka, odnosno tablica za simulacijski model.

5.8 Izrada modela

Model je izrađen u softveru *Technomatic Plant Simulation*. Simulacijskim modeliranjem se omogućuje variranje parametara a time i razmatranje različitih proizvodnih scenarija.

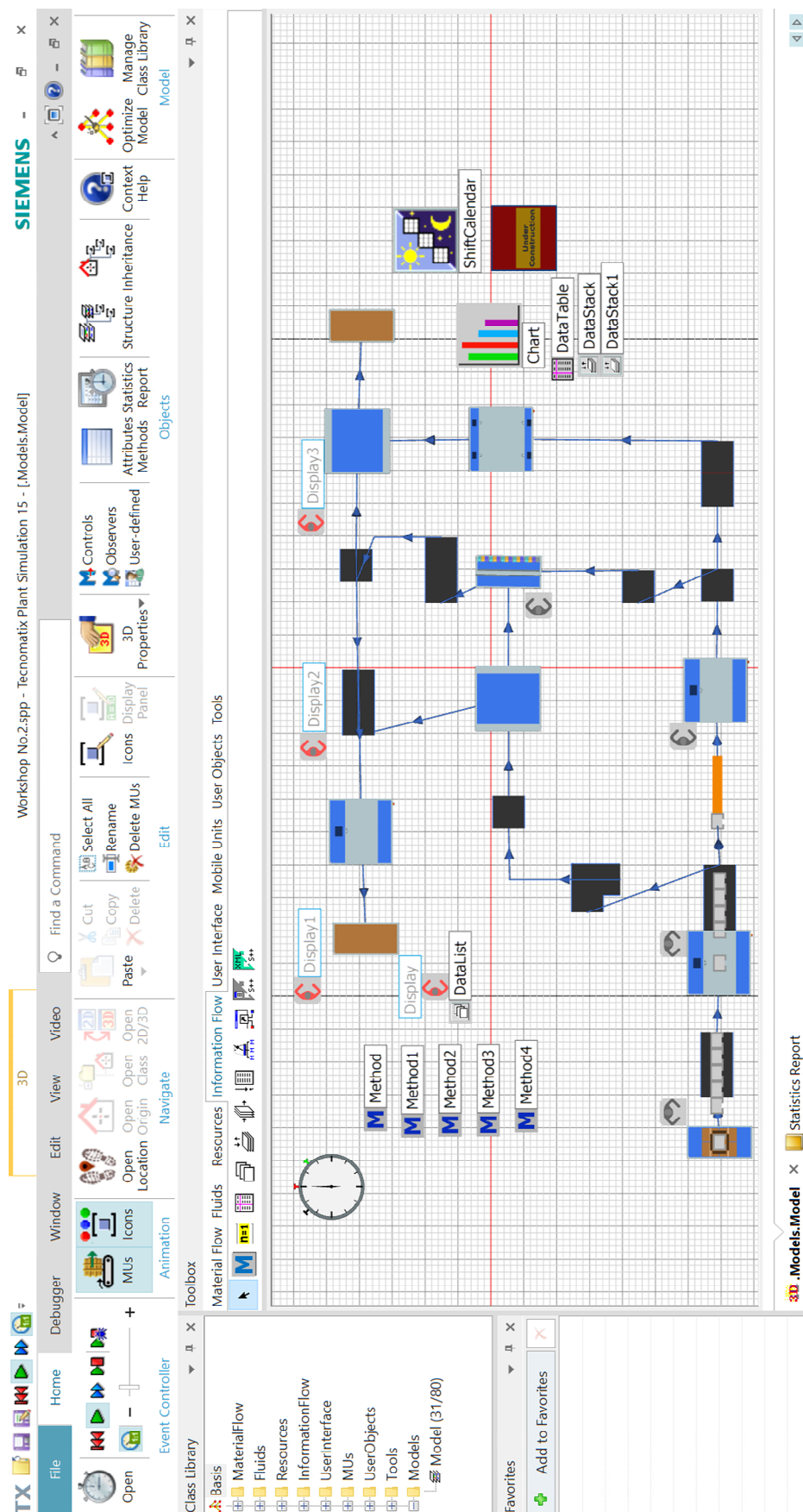
Na slici 5.4 prikazan je simulacijski model u softveru *Technomatic Plant Simulation* [91, 92]. Model se formira na način da opisuje ponašanje stvarnog proizvodnog procesa s realnim vremenima, brzinom obrade, simuliranje realnih transportnih vremena, stvarnim prostornim dimenzijama i udaljenostima između pojedinih aktivnosti u radionici.

Tijekom formiranja i izrade samog modela povremeno se provjerava sama funkcionalnost modela, te ukoliko se uoči nedostatak nekog podatka, osmišljena baza podataka dodatno dopunjava. Ulazni asortiman u Privitku br.4 rada.

Prilikom unošenja podataka u model vodilo se računa o tlocrtnom rasporedu opreme za rezanje, zavarivanje, transportnim sredstvima, dizalicama te o prostornom razmještanju opreme, njihovoj međusobnoj udaljenosti što će sve biti važan input prilikom definiranja prijedloga za unaprjeđenje procesa.

Prilikom projektiranja određenog modela, projektant ima slobodu mijenjati podatke, dodavati i korigirati pojedine podatke kako bi izlazni rezultat bio što bliži ciljevima projekta. Tijekom rada na modelu potrebno je provjeravati logiku funkcioniranja modela te eventualno korigirati model ukoliko se uoče nelogičnosti.

Kako je izrada modela aktivan proces uneseni podaci se ažuriraju, vrednuju, dorađuju i na taj način se formirani model unaprjeđuje i predstavlja kvalitetnu bazu i nakon modernizacije procesa u radionici.

Slika 5.4 Simulacijski model radionice u softveru *Technomatic Plant Simulation*

5.8.1 Proizvodno vrijeme aktivnosti u simulacijskom modelu

Prilikom registriranja podataka u modelu važno je voditi računa o proizvodnim vremenima; razlikuju se pet skupina vremena:

- Vrijeme postavljanja (*eng. Set Up Time*); vrijeme potrebno za postavljanje osnovnog objekta za obradu. Koristi se i za redovitu izmjenu alata.
- Vrijeme oporavka (*eng. Recovery Time*); Na ulazu u objekt koji vrši obradu postoji ulaz koji se zatvara na određeno vrijeme nakon ulaska proizvoda, ujedno služi za umetanje segmenata koje treba popraviti.
- Procesno vrijeme (*eng. Processing Time*); definira vrijeme koje objekt provede na mjestu obrade, od trenutka postavljanja do trenutka završetka obrade objekta na mjestu obrade,
- Vrijeme ciklusa (*eng. Cycle Time*); vrijeme koje protekne kada segment koji se obrađuje uđe do trenutka dok ne napusti određeno radno mjesto (radnu stanicu) nakon što je obrađen na toj istoj radnoj stanici. Ponekad se naziva i vrijeme radne stanice.

Vrijeme ciklusa je važan parametar stoga što u simulaciji daje uvid kako odrediti ukupno vrijeme izrade za određeni proizvod na proizvodnoj liniji,

- Taktno vrijeme (*eng. Takt time*); Nastaje s obzirom na zacrtanu potražnju prema određenom proizvodu i izražava se u terminima raspoloživog vremena u proizvodnom sustavu do količine koja je tražena od proizvodnog procesa. Smatra se i neto vremenom dostupnim za realizaciju planirane obrade.
- *Event Controller* koordinira i sinkronizira različite scenarije koji se događaju tijekom proizvodnog procesa.

U simulacijskom modeliranju obično se kalkulacije definiraju za određeno vremensko razdoblje (mjesec ili godina) pa se tada koristi *Event Controller*.

5.9 Verifikacija simulacijskog modela

Provjera unesenog simulacijskog modela sastoji se od utvrđivanja da li je predloženo rješenje ujedno i odgovor na pitanje primjene simulacijskog modeliranja za poboljšanje procesa.

U slučaju nedosljednosti ili nelogičnosti u rezultatima potrebno je pristupiti dodatnoj analizi simulacijskog modela kako bi se dobila što realnija slika stanja proizvodnog procesa. Pri provjeri modela, u slučaju uočavanja ozbiljnih poremećaja ili nedosljednosti, potrebno je pronaći moguće uzroke nerealizacije u skladu s osmišljenim modelom.

Prilikom kreiranja modela kao simulacije stvarnog stanja u radionici, vodilo se računa o označavanju segmenata, alata, strojeva i transportnih sredstava i njihovih međusobnih položaja.

Promjenom parametara mogu se dodatno testirati podaci na način da se promjenom određenih parametara promatra ponašanje modela ili se izdvoji jedno mjesto obrade pa se analizira da li je došlo do očekivanih rezultata.

Po završetku testiranja simulacijski model može se prihvatiti kao odgovarajući za donošenje zaključaka vezano za ciljeve projekta kao i za eventualnu daljnju analizu za potrebe unaprjeđenja nekog drugog segmenta procesa.

5.10 Opis i analiza simulacijskog modela

S obzirom na osnovani model i dobivene rezultate simulacijskog procesa, vrši se analiza ostvarenja planiranih ciljeva projekta. Na analiziranoj liniji nalazi se 5 stanica u kojima se odvijaju dijelovi proizvodnog procesa kako je prethodno prikazano:

1. Stanica 1 (S1): Ovo je stanica u kojoj se vrši rezanje profila,
2. Stanica 2 (S2): Ovo je stanica na kojoj su aktivnosti poput obilježavanja, obrade rubova, rezanja limova,
3. Međuskladište 1 (MS1): Međustanica sortiranja profila,
4. Međuskladište 2 (MS2): Međuskladištenje limova,
5. Stanica 3 (S3): Ovo je stanica na kojoj se vrši zavarivanje limova u panele,
6. Stanica 4 (S4): Ovo je stanica u kojoj se obilježavaju i zavaruju profili na panele,
7. Stanica 5 (S5): Ovo je radna stanica za završetak panel linije,
8. Međuskladište (MS3): Priprema i međuskladištenje te okretni stol za liniju zavarivanja manjih sklopova, robot i automatsku liniju ravnih sekcija.

U tablici 5.10 prikazano je vrijeme ciklusa za svaku radnu stanicu za analiziranu odabranu skupinu materijala za grupe nadgrađa.

Tablica 5.10 Specifikacija radnih stanica u procesu

Stanica	Opis	Vrijeme ciklusa	Broj operatera
S1	Rezanje profila	76 min	2
S2	Rezanje limova	98 min	6
MS1	Priprema profila/ međuskладиšte	8 sati	2
MS2	Priprema limova/ međuskладиšte	8 sati	2
S3	Panel linija	130.8 min	4
S4	Namještanje i zavarivanje profila	110 min	2
S5	Završetak linije panela	96 min	8
MS3	Međuskладиšte	8 sati	2

- Ulazni parametar za prethodno opisani proces su pripremljeni limovi i profili (dostavljeni na vrijeme), a konačni rezultat linije su ukrijepljeni paneli odgovarajućih dimenzija, koji se koriste dalje za slijedeći takt tehnološkog proces.
- Pretpostavljeno raspoloživo radno vrijeme je 8 sati dnevno, 24 radna dana mjesečno.
- Analiziran je zahtjev za obradom 98 ukrijepljenih panela.
- Analizirana je obrada 882 lima i 3000 profila.

Analiza radne stanice (S3) kao najvažnije u ovoj radionici.

- **Analiza vremena za radnu stanicu 3 (S3) izrada ukrijepljenih ravnih panela**

Proračun taktnog vremena je izvršen na slijedeći način:

Taktno vrijeme (S3) = $\frac{\text{Raspoloživo vrijeme}}{\text{Zahtjevi za izradom}} = \frac{8 \times 24 \times 60 \text{ min}}{98 \text{ panela}} = 118 \text{ min po panelu (2 sata po panelu)}$

Ovim se prikazuje potreba za izradom jednog panela svakih 118 min kako bi se na mjesečnoj razini obradilo 98 panela za odabranu skupinu materijala grupa nadgrađa.

Pretpostavka protoka limova kroz panel liniju je 88%, odnosno ovo čini postotak limova od ukupnog broja, koji je određen ići na panel liniju. Preostala količina limova odlazi dalje u tehnološki proces.

Taktno vrijeme ciklusa (S3) = $\frac{\text{Raspoloživo vrijeme}}{\text{Zahtjevi za obradom} \times \text{postotak protoka}} = \frac{8 \times 24 \times 60}{882 \times 0.8} = 16.32 \text{ min}$
po limu

Budući da radna stanica panel linije ima kapacitet proizvodnje 130.8 min/panelu (vrijeme ciklusa), koje je veće od taktnog vremena (118 min), neće se zadovoljiti zahtjev za proizvodnjom odabrane skupine materijala za 98 panela grupa nadgrađa.

Analiza se vrši za obradu limova (1000), 88% ide na panel liniju (882), odabranih za proizvodnju 98 panela.

U Privitku br.4 rada, prikazan je primjer procjene vremena ciklusa za radnu stanicu panel linije.

Brzina zavarivanja za različite debljine dobivena je interpolacijom:

Debljina lima (mm)	Brzina zavarivanja (cm/min)
5	96
6	?
7	?
20	50

$$\begin{aligned} \text{Za debljinu lima od 6 mm} &= 50 + (96 - 50) \times (20-6)/(20-5) \\ &= 92.78 \text{ cm/minuti} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Procesno vrijeme} &= \text{duljina zavarivanja/brzina zavarivanja} \\ &= 600 \times 30 / 92.78 \text{ cm/min} = 19.4 \text{ minuta} \end{aligned}$$

Pošto je devet limova u panelu, bit će ukupno osam jednostrano zavarenih spojeva, zavarenih jednim prolazom dvoosnom glavom za zavarivanje; vrijeme ciklusa se može procijeniti kao 15% procesnog vremena.

$$\begin{aligned} \text{Vrijeme ciklusa} &= \text{procesno vrijeme} \times 1/0,15 \\ &= 19.4 \text{ min} / 0.15 \\ &= 129 \text{ min/ po panelu (zavarivanje)} \end{aligned}$$

$$\text{Sveukupno vrijeme ciklusa (98 panela)} = 129 \times 98 = 12642 \text{ min} = 210 \text{ sati } 7 \text{ min}$$

Na isti način se može vrijeme ciklusa provjeriti za ostala radna mjesta i ostale obradne stanice kako slijedi;

- **Analiza vremena za radnu stanicu 1 (S1), rezanje profila**

Kako bi se odredilo vrijeme ciklusa za ovu radnu stanicu (S1) obradne aktivnosti rezanja profila, u razmatranje se uzimaju slijedeći parametri:

- Brzina stroja (800mm/minuti),
- Duljina profila,
- Procesno vrijeme čini 55% vremena ciklusa

U Privitku br.4 rada, prikazana je procjena vremena ciklusa za operaciju rezanja profila. Za 9 profila (na panelu), ukupno vrijeme ciklusa iznosi *75.55 min / po panelu*.

- **Analiza vremena za radnu stanicu 2 (S2), obilježavanje, obrada rubova i rezanje limova**

Kako bi se odredilo vrijeme ciklusa za ovu radnu stanicu (S2) obradne aktivnosti obilježavanja i obrade rubova, u razmatranje se uzimaju slijedeći parametri:

- Brzina stroja (600mm/minuti),
- Duljina i širina lima,
- Procesno vrijeme čini 60% vremena ciklusa

U Privitku br.4 rada, prikazana je procjena vremena ciklusa za operaciju obilježavanja i obrade rubova limova.

Procesno vrijeme se računa na način:

Ukupna duljina obrezanog lima/ brzina rezanja:

$$L = (12\,000 \times 2 + 2000 \times 2) / 600 = 46,66 \text{ min}$$

Za operaciju rezanja limova uzimaju se slijedeći parametri:

- Brzina stroja (procjena 950 mm/min),
- Dimenzije izreza,
- Vrijeme postavljanja (procjena 1,0 min) po izrezu,
- Vrijeme ciklusa kao zbroj vremena obrade i vremena postavljanja

U Privitku br.4 rada, prikazani su ulazni podaci za određivanje vremena ciklusa rezanja limova.

Ukupno vrijeme za radnu stanicu (S3), obilježavanja, obrade rubova i rezanje limova
 $= 77,76\text{min} + 18,82 \text{ min} = 96,58 \text{ min}$

- **Analiza vremena za radnu stanicu 4 (S4), namještanje i zavarivanje profila na panele**

Za radnu stanicu namještanja (postavljanja) profila uzimaju se slijedeći parametri:

- Brzina stroja (procjena brzina 3800mm/min),
- Broj profila za namještanje i broj limova,
- Procesno vrijeme se računa kao 25% vremena ciklusa

U Privitku br.4 rada, definirani su ulazni podaci za određivanje ciklusa na radnoj stanici (S4) za postavljanje profila.

- **Analiza vremena za radnu stanicu 4 (S4), zavarivanje profila**

Za radnu stanicu zavarivanja profila uzimaju se slijedeći parametri:

- Brzina stroja (procjena brzine 680 mm/minuti),
- Broj profila (ukrućenja) koji se zavaruju i broj limova,
- Procesno vrijeme se računa kao 75% vremena ciklusa

U Privitku br.4 rada, definirani su ulazni podaci za određivanje vremena ciklusa na radnoj stanici (S4) za zavarivanje profila.

Ukupno vrijeme za radnu stanicu S4, namještanje i zavarivanje profila

$$= 37,88\text{min} + 70,58 \text{ min} = 108,46 \text{ min}$$

- **Analiza vremena za radnu stanicu 5 (S5) kompletiranje i završetak panela**

Za radnu stanicu (S5) kompletiranje i završetak izrade panela, aktivnosti se odvijaju povremeno ovisno o rezultatima i kvaliteti rada na strojevima, te će se ovdje procjena vremena dati kao iskustvena vrijednost od 96 min.

U slijedećoj tablici 5.11 dani su podaci po radnim stanicama prema prethodnoj analizi izračuna *procesnih vremena* i *vremena ciklusa* kako slijedi:

Tablica 5.11 Vremena ciklusa za radne stanice proizvodnog procesa

Radna stanica	Opis	Vrijeme ciklusa (min)	Ulazni podaci / vrijeme ciklusa (min)
S1	Rezanje profila	72.02	76
S2	Obilježavanje, obrada i rezanje limova	96.58	98
MS1	Priprema profila/ međuskladište	8 sati	8 sati
MS2	Priprema limova/ međuskladište	8 sati	8 sati
S3	Panel linija	129	130.8
S4	Pozicioniranje i zavarivanje profila	108.46	110
S5	Završetak linije panela	96	96
MS3	Međuskladište	8 sati	8 sati
Ukupno vrijeme ciklusa:		502.06 min	510.8 min
Sveukupno vrijeme procesa		8 sati i 36 min + 24 sata = 32 sata i 36 min	8 sati i 51 min + 24 sata = 32 sata i 51 min

Provjerom simulacije temeljem početno postavljenih ulaznih podataka utvrđeno je ukupno vrijeme ciklusa izrade ukrijepljenog panela za (isključujući vrijeme međuskladištenja):

$$502.06 \text{ min} = 8 \text{ sati i } 36 \text{ min}$$

U usporedbi s početno postavljenim iskustvenim podacima za vremena ciklusa pojedinih radnih stanica odnosno za proizvodnju cjelokupnog procesa od $510.8 \text{ min} = 8 \text{ sati } 51 \text{ min}$.

Ako se u cjelokupni zbroj sati doda vrijeme međuskladištenja $MS1 + MS2 + MS3 = 24 \text{ sata}$, uočava se da postojeći tehnološki proces temeljem predloženih početnih značajki tehnološkog procesa u radionici, *ne ispunjava zacrtani cilj proizvodnje 98 ukrijepljenih panela*.

Predlaže se analiza predložene linije s ciljem definiranja značajki procesa, pronalaženja uskih grla, te iznalaženje segmenata procesa koje se treba optimizirati i predložiti poboljšanja postojećeg sustava kako bi se ostvarilo postizanje cilja.

5.11. FAZA 4 - Analiza radnih stanica i unaprjeđenje procesa

Analiziraju se slijedeći segmenti procesa:

- Pravovremena dostava materijala do radnih stanica,
- Tehničke mogućnosti podnih transportnih sredstava i transportnih dizalica,
- Tehničke mogućnosti brzine rada strojeva na radnim stanicama,
- Brzine rezanja i zavarivanja strojeva na radnim stanicama,
- Mogućnosti za skraćenje vremena međuskladištenja materijala koje traje 8 sati,
- Brzina i način prijenosa informacija i materijala do radnih mjesta,
- Brzina i točnosti prikupljanja i obrade podataka o svim radnim aktivnostima u radionici.

Razmotrene su značajke koje je moguće mijenjati (poboljšati), dok za značajke koje nije moguće mijenjati bez značajnih investicijskih zahvata u modernizaciju radionice kao i značajki prostornog ograničenja (dimenzije radionice, transportera, kapacitet dizalica i sl.) te tehničkih značajki opreme neće se razmatrati u analizi.

Tehničke značajke strojeva je vrlo teško poboljšati zbog tehničkih mogućnosti strojeva uvjetovanih od proizvođača opreme a bez značajnijih financijskih investicija u modernizaciju ili kupnju novih strojeva, također i tehničke mogućnosti valjčastih transportera se malo vjerojatno mogu znatnije poboljšati kao i rad dizalica u radionici. Stoga se sugerira poboljšanje u bržoj dostavi materijala do radnih mjesta i kraćem vremenu međuskladištenja limova i profila između pojedinih radnih stanica, te cjelokupnom prikupljanju i obradi podataka kako bi se pravovremenim informacijama prevenirala kašnjenja, gubici materijala, netočnost dostavljenih pozicija i periodi čekanja materijala.

Iz analiziranog modela dolazi se do zaključka da su slijedeća mjesta gdje se aktivnost treba poboljšati:

- Poboljšati brzinu protoka materijala u radionici,

Uočeno je da su međuskladišta MS1, MS2 i MS3 „uska grla“, mjesta na kojima se događa predug vremenski period boravka materijala, te su tu moguća značajna poboljšanja u smislu skraćanja odlaganja segmenata, kontrole segmenata koji su na njima odloženi, brzine međudostave segmenata odloženih na palete kao i pojedinačnog transporta.

- Poboljšati točnost prijenosa i pravovremenost prikupljanja podataka o vremenima odvijanja aktivnosti na strojevima,
- Poboljšanje razmjene informacija o aktivnostima u radionici između operatera na pojedinim radnim mjestima.

5.12. Unaprjeđenje značajki procesa u radionici

Temeljem provedene analize tokova materijala i mogućnosti provođenja pokusa na način da se postigne ciljano vrijeme trajanja međuskladištenja materijala sa sadašnjih 24 sata na ciljano vrijeme ispod 10 sati kako bi sveukupno traženo *taktno vrijeme* bilo ispod 32 sata i 36 min.

Da bi se ostvarilo ciljano unaprjeđenje procesa temeljem dosadašnjih istraživanja autorice, predlaže se primjena koncepta *progresivno RFID povezivanje* komponenti u radionici.

Istraživanjem u dostupnoj literaturi, RFID tehnologija implementacije u brodograđevnom procesu razmatrana je na primjeru proizvodnje opreme za brod ali ne i za segmente trupa. Razmatranje primjene ove tehnologije predstavlja kvalitetan temelj primjene odabranih elemenata koncepta u brodograđevnom proizvodnom procesu, u cilju dostizanja najviše tehnološke razine *Brodogradnja 4.0* [96, 97, 99, 102, 103].

Analizira se ugradnja RFID oznaka za segmente (limove, profile), palete, strojeve u radionici i transportna sredstva u radionici. Uz tako veliki broj i različitu tipologiju strukturnih elemenata koji prođu kroz radionicu, sljedivost i status svakog segmenta procesa ubrzava njihove postupke održavanja, ubrzava njihovo lociranje i omogućuje jednostavno dobivanje njihovih karakteristika prilikom ugradnje i montaže.

Predlaže se automatska identifikacija strukturnih elemenata, praćenje i kontrola sljedivosti pojedinih strukturnih elemenata, te senzoriranje sredstava transporta kao i uređaja za zavarivanje. Ovako osmišljen proces predstavlja temelj formiranja digitalnog blizanca, kibernetско-fizičkog sustava, interneta stvari te ostalih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*.

Sustav pametnog koncepta pruža pouzdanu platformu za daljinsko praćenje klimatskog okruženja u radionici, sigurnosti rada, te strateškog i ekonomskog napretka.

5.13. Osnovne tehničke značajke RFID tehnologije

Primjenjujući progresivno RFID povezivanje u radionici omogućuje se praćenje skoro 60% ukupno ugrađenih komponenti koje prolaze kroz proces i 90% tehničkih i tehnoloških resursa koji se uzimaju u razmatranje u brodograđevnoj radionici [104, 105, 106, 107]. Na svaki strukturni element moguća je ugradnja oznake koja identificira element, površinu i blok odložen na određenu paletu s pozicije na početku procesa. Koncept praćenja strukturnih elemenata, odnosno protoka materijala kroz radionicu, poboljšava raspored proizvodnje na ovaj način ostvaruje se praćenje odvijanja procesa montaže i zavarivanja [107, 108].

Upravljanje obavijestima nastalim snimanjem poremećaja i grešaka u proizvodnji omogućuje se formiranje relevantnih informacija u realnom vremenu dostupnih svim razinama upravljanja u radionici.

Postoji mogućnost aktiviranja alarma u pojedinim hitnim slučajevima ili anomalija prikupljenih podataka koji se prikupljaju u radionici. Podaci se prikupljaju na mobilnim uređajima ili tabletima, a obavijesti o promjenama stižu do operatera, poslovođe, voditelja radionice i direktora. Svatko od njih će imati mogućnost prikupljanja određene razine agregiranih informacija. Na slici 5.5 prikazana je usporedba različitih tehnologija identifikacije [109].

Factor	Deployment	Metal	Water	Corrosion	Interference	Reading Dist.	Temperature	Pressure	Battery	Mobility	Cost
LF RFID				*			*	*			
HF RFID				*			*	*			
UHF RFID				*			*	*			
BLE				*			*	*			
Wi-Fi											
UWB											
Ultrasounds											
ZigBee											
DASH7				*			*	*			
Z-Wave				*							
WirelessHART											
RuBee											

Slika 5.5 Usporedba različitih identifikacijskih RFID tehnologija [109].

Zelena oznaka znači usklađenost s operativnim i tehničkim zahtjevima, žuta (djelomično ispunjena) crvena (nije usklađena) [109].

Prema ovom istraživanju došlo se do slijedećih rezultata za RFID signal:

- 2,4GHz RFID; performanse opadaju uslijed radne frekvencije, poglavito u prisutnosti metala, tekućina i smetnji uzrokovanih drugim sustavima,
- BLE i Wi-Fi; dijele radnu frekvenciju s 2,4GHz RFID te dijele iste probleme,
- ZigBee, Z-Wave; tehnologije usmjerene na primjeni senzorskih mreža, primjena je moguća no nisu primjenjive na uvjete rada u brodogradilištu;
- Ultrazvuk; nedostatak mu je potreba za izravnom vezom između čitača i oznake i kod njih se javljaju smetnje,
- UWB; postižu izravnu preciznost u primjeni, ali se konstatira njihova nemogućnost korištenja u brodograđevnom okruženju,
- DASH7; mogućnost korištenja u brodograđevnom okruženju do 2,4GHz i imaju mogućnost očitavanja do 100m.
- UHF RFID; koriste frekvenciju ispod 1 GHz te su uporabljive u brodograđevnom okruženju.

Odabir je da se ide na korištenje aktivnih RFID oznaka, istraživanje je pokazalo da je samo s aktivnim RFID oznakama moguće postići stalni nadzor odnosno svaki strukturni element preko razine signala „informira“ o svom položaju u radionici čak i na većim udaljenostima.

RFID praćenje procesa sastoji se od komponenti: oznaka, čitača i poslužitelja. Oznake su transponderi mikročipova na bazi silicija, sa svojom jedinstvenom ID oznakom, antenom za prijem i prijenosnim signalom. Predlaže se uporaba RX202 čitača i aktivne oznake IP67, tvrtke „Wavetrend“ [109]. Sustav RFID komponenti sastoji se od nekoliko softverskih modula:

- *Lokacijskog modula*, koji omogućuje dobivanje koordinata svakog signala iz pojedinačnog senzora obrađenog putem kolektora podataka prikupljenih putem signala,
- *Kolektorski modul* (modul za prikupljanje podataka) koji funkcionira kao čitač podataka prikupljenih putem RFID-a,
- *Modul obrade* prikupljenih podataka s prikazom svake oznake koja djeluje kao sučelje s RFID čitača,
- *Modul pohrane* prikupljenih podataka, prikupljeni podaci pohranjuju se u veliku bazu podataka s otiscima svakog čitača i senzora,
- *Modul selektiranja* podataka, na osnovu definiranih prioriteta aktivira se ovisno o trenutnom položaju pojedinog strukturnog i opremnog elementa. U njemu su

sadržani podaci o prethodnom proizvodnom procesu svakog pojedinog segmenta, radionice, alate i uređaje kroz koje je prošao, njegov trenutni položaj u radionici kao i budući koji treba proći da bi zajedno s ostalim segmentima bio ugrađen u blok trupa.

Modul vizuelnog prikaza pojedinog segmenta trupa ili opreme, vidljiv je svim operaterima i zaposlenicima uključenim u proizvodni proces.

Modul sustava izvršenja aktivnosti, omogućava prikupljanje informacija o karakteristikama pojedinog segmenta trupa, transportnih sredstava, elemenata za skladištenje ili opreme s obzirom na cjelokupni lanac vrijednosti koji se stvara kako proizvodni proces napreduje i raste. U ovu aktivnost su uključeni svi koji pravovremeno dobivaju informacije o eventualnim izmjenama, tako da pravovremeno mogu ažurirati projektna rješenja i narudžbu materijala. U slučaju izmjene mogu pravovremeno, svako u svom segmentu imati točnu informaciju i odmah reagirati na promjene u procesu.

Automatska identifikacija povezana je metodama koje automatski identificiraju objekte, prikupljaju podatke o njima i unose ih izravno u računalne sustave, bez intervencije čovjeka [109].

Selektiranje RFID oznaka može se podijeliti na slijedeći način:

- *aktivne* oznake s unutrašnjom baterijom koja služi za napajanje RF kruga,
- *pasivne* oznake međusobno komuniciraju bez unutrašnjeg napajanja, koristi energiju iz čitača radijskih valova za napajanje RF kruga,
- *polupasivne* oznake komuniciraju poput pasivnih, no imaju unutrašnje napajanje (baterije) koje napaja sklopove senzora i memorije.

Kako je prethodno navedeno sugerira se uporaba aktivnih oznaka koje imaju sposobnost komunikacije na udaljenosti od cca 90m. Prikupljeni podaci pohranjuju se u SQL bazu podataka.

5.13.1 Tehnologija prikupljanja podataka korištenjem RFID komponenti

Da bi se proces mogao pratiti korištenjem RFID tehnologije, potrebno je oformiti modelsku senzorsku mrežu, za to služe RFID uređaji koji vrše očitavanje jedinstvenog identifikacijskog koda segmenata. Senzori koji očitavaju uvjete u radionici detektiraju

postojeće uvjete za zavarivanje, temperaturu i vlažnost u radionici, te napon u mreži za potrebe rada uređaja za zavarivanje.

Senzorima se prikupljaju podaci o veličini, broju i položaju zavara, naponu, struji za zavarivanje kao i brzini zavarivanja, položaju zavara i brzini dodavanja žice za zavarivanje. Na isti način se predlaže praćenje strojeva za rezanje.

Vizuelni senzori se koriste za praćenje transporta segmenata, njihovog položaja u radionici i procesu zavarivanja. Podaci se prenose putem bežične mreže dok se obrada podataka, grupiranje i analiza podataka u konačnici obrađuju računalno u vremenu (odmah), čime svi sudionici u proces imaju uvid i trenutno stanje procesa.

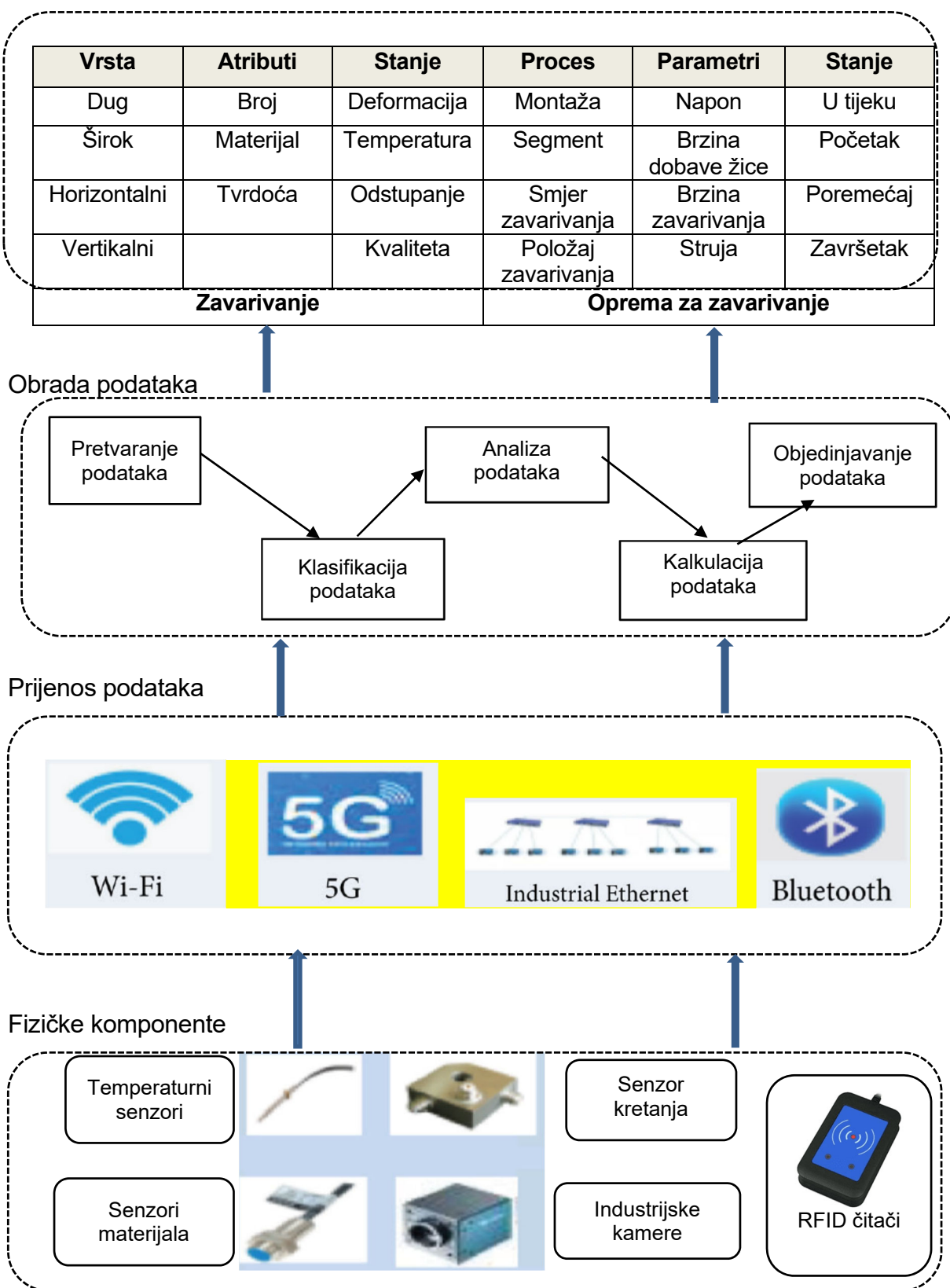
Na slici 5.6 predstavljen je dijagram toka procesa prikupljanja podataka za proces montaže i zavarivanja u stvarnom vremenu.

RFID čitači funkcioniraju na način da čip putem radio signala aktivira prijenos informacija. Sama oznaka identificira kretanja u radionici. Čitač prima sadržaj u oznaci memorije, najčešće svaki od dionika procesa, ima svoj jedinstveni identifikacijski kod. Kada antena otkrije magnetsko polje detektira čitač, dekodira podatke i prosljeđuje računalu.

Tehnički i tehnološki zahtjevi prema senzorskoj opremi:

- RFID oznake zahtijevaju posebnu pozornost s obzirom na agresivnost okoliša u smislu elektromagnetskog širenja i izloženosti vanjskim smetnjama (udarci, tlak, kiselina, visoka temperatura),
- Razmještaj: Oznake se postavljaju u radionici kako je predloženo na slici 5.7, međusobni razmak daje mogućnost cjelokupnog nadzora procesa,
- Prisutnost metala; u radionici ima mnogo metalnih elemenata koji mogu ometati RFID komunikaciju, te je potrebno upotrijebiti samo oznake koje su otporne na ovakve vanjske utjecaje.
- Izloženost visokoj temperaturi, kiselinama, salinitetu, gorivu i drugim korozivnim tvarima; oznake trebaju biti otporne na procese odmašćivanja, zagrijavanja, odžarivanja, označavanja, unošenja visokih temperatura i sl.
- Komunikacijske smetnje; odabrana tehnologija treba biti sposobna prenositi podatke u prisutnosti uobičajenih ometača signala, Wi-fi, Bluetooth, radarski testovi čija frekvencija kreće od nekoliko desetaka MHz do GHz.

Senzorski podaci



Slika 5.6 Prikupljanje podataka o procesu u stvarnom vremenu [56, 109]

- Udaljenost čitača; sustav nadzora mora omogućiti pristup podacima o lokaciji udaljenosti računala. Takve informacije o identifikaciji i lokaciji trebaju biti u mogućnosti da očitavanje podataka bude u skladu s raspodijeljenim tipom sustava čitača čime se stvara mreža koja pokriva proizvodni proces radionice.
- Tolerance na visoku temperaturu u procesu rezanja i zavarivanja segmenata trupa; proces se događa kod visokih temperatura i izloženost oznaka je visoka.
- Trajanje baterije na čitaču; trebalo bi omogućiti sljedivost segmenata sve do trenutka ugradnje, odnosno sve do primopredaje broda, period od cca 2 godine.

5.14. Prikaz i analiza unaprjeđenja značajki procesa u radionici

Na slici 5.7 prikazan je prijedlog osmišljenog senzoriranog procesa. Predstavljen je prijedlog razmještaja RFID oznaka i RFID čitača u radionici prikazan na simulacijskom modelu dijela brodograđevnog proizvodnog procesa.

Kako je vidljivo na simulacijskom modelu, predlaže se razmještaj RFID oznaka i RFID čitača na opremu, transportna sredstva i segmente koji se zavaruju. Aktivnosti obilježavanja segmenata trupa bi se odvijale prije ulaska materijala u radionicu, te se predlaže kontinuirano praćenje kretanja segmenata kroz proces kao i aktivnosti transporta i stanja materijala na međuskladištima (MS1), (MS2) i (MS3).

5.15 Analiza toka materijala primjenom RFID tehnologije

Kako je u prethodnim poglavljima opisano, za praćenje tijekom materijala, limova, profila i izrezanih segmenata trupa, koriste se RFID oznake koje se pričvršćuju na limove i profile nakon pjeskarenja a prije ulaska na prvu radnu stanicu S1 (za profile) i S2 (za limove). Čitači oznaka su uređaji koji pretvaraju optičke impulse u električne signale, stoga je ključno postići zadovoljavajuću vidljivost i čistoću prijenosa signala.

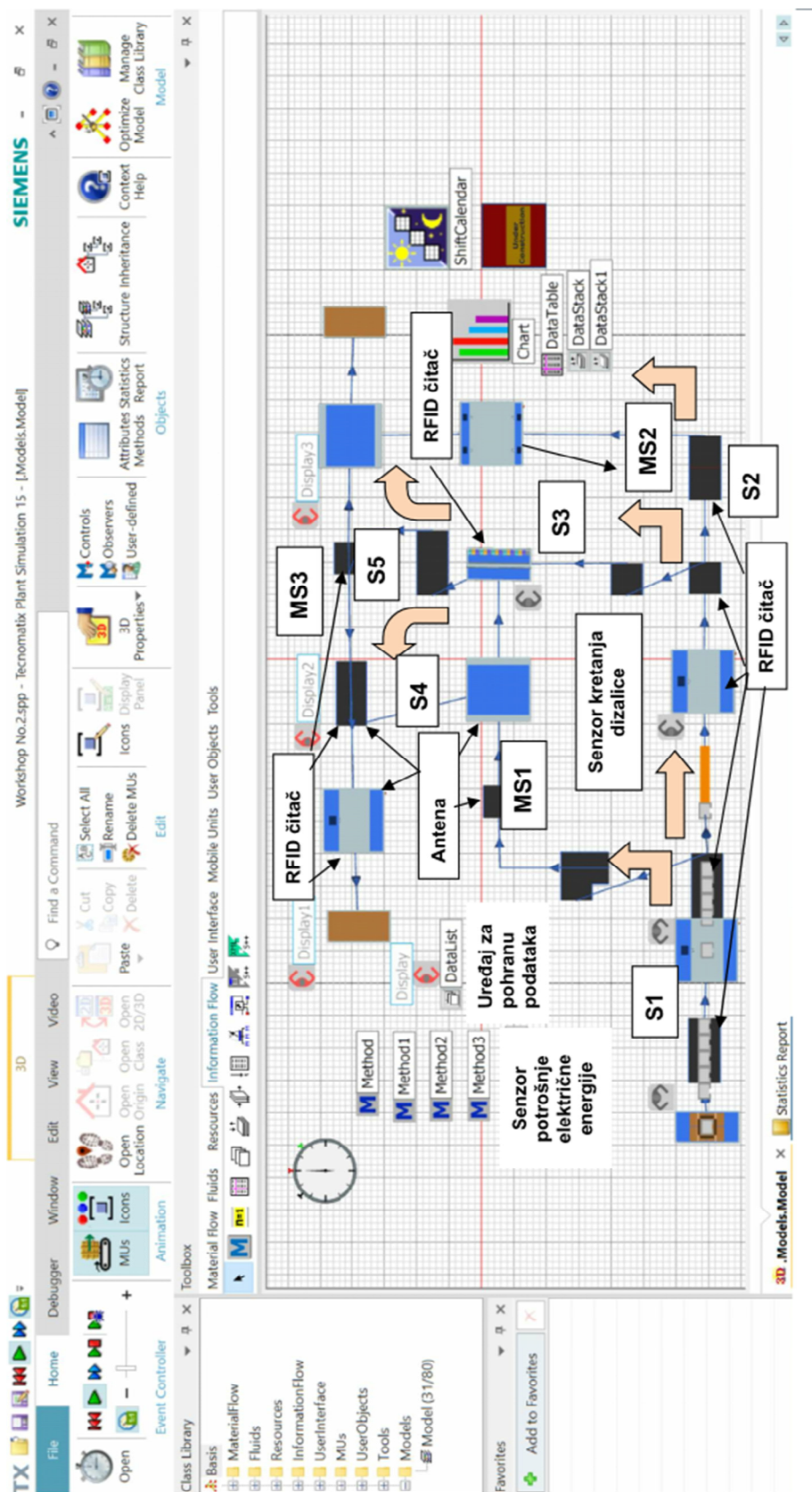
Organizacija tehnološkog procesa prikazana na senzoriranom simulacijskom modelu:

- **Dostava i označavanje limova i profila prije ulaska u prvu radnu stanicu (S1).**

Priprema limova i profila nakon pjeskarenja a prije ulaska na (S1) organizirana poput pametne pripreme procesa, na način da operater pričvrćuje RFID oznake na limove i profile koji su predviđeni za dostavu do prve radne stanice u radionici. Računalno se bilježe sve karakteristike koje mu stižu kao informacija putem RFID čitača i prijenosnika. Razina popunjenosti pripremnog skladišnog prostora ispred radne stanice bilježi se automatski.

Segmenti su složeni na palete koje također imaju svoju oznaku, te je na taj način olakšano njihovo praćenje te su izmjene u sastavu segmenata koji idu na slijedeći korak tehnološkog procesa vrlo jednostavne:

- Operater putem RFID čitača dobiva podatke za svaku paletu pomoću oznake pričvršćene na paletu,
- Palete se premještaju dizalicom kroz radionicu. Prijenos se vrši tek kada se za to ukaže potreba,
- Kada se paleta prenese na neku drugu poziciju, operater putem RFID čitača i RFID oznaka dobiva informacije o procesu koji treba izvršiti za određeni tehnološki proces u radionici,
- Istovremeno s aktiviranjem oznake na segmentu koji je u procesu određuje se i lokacija gdje je segment pozicioniran u određenom trenutku,
- Svaka oznaka registrirana je u bazi podataka na prijenosnom računalu.



Slika 5.7 Razmještaj RFID oznaka i čitača na radnim stanicama

Automatsko označavanjem materijala u radionici

RFID oznake selektiraju se na dva načina:

- Prema frekvenciji rada,
- Prema načinu napajanja.

RFID označavanje predstavlja veliku prednost u rukovanju materijalom, naime poznavanjem stvarnih potreba za obradom pojedinih segmenata u procesu omogućuje se optimizacija njihovog skladištenja, izbjegavaju se zalihe (problemi s prostorom), kašnjenje i korozija uslijed nepotrebnog stajanja.

Registiranje pozicije materijala u radionici

Raspolaganjem točnih pozicija segmenata koji trebaju ići na određenu radnu stanicu, sprječava se greške točnog položaja segmenata koji se trebaju obraditi. Nepoznavanje položaja segmenata koji se trebaju obraditi uzrokuje gubitak vremena. Predloženi sustav praćenja locira u stvarnom vremenu segmente koji trebaju biti u radionici i to ne samo oni koji se obrađuju već i one koji se nalaze na međuskladištima.

RFID označavanjem cjeloviti sustav omogućuje praćenje stanja materijala u radionici u stvarnom vremenu. Za cjelokupni proces praćenja dovoljan je po jedan operater koji uz radne stanice prikuplja podatke iz 3 RFID čitača, te jedan operater koji prati klimatske uvjete i elektro bilancu u radionici čime se aktivira automatska dostava materijala do radnih stanica i vrijeme trajanja vremena ciklusa na pojedinim radnim stanicama. Na ovaj način omogućuje se automatizacija aktivnosti zadataka obavještavanja operatera o dolasku segmenata u određenu fazu proizvodnog procesa radionice.

Optimizacija transportnih ruta

Nakon što se izradi sustav automatskog lociranja segmenata trupa u radionici, poboljšava se kapacitet sustava za optimizaciju transportnim rutama, te skraćuje ruta dostave materijala do radne stanice; krajnji cilj je optimizacija proizvodnog i montažnog vremena odabirom najkraće rute za prijenos i montiranje segmenata na određenom montažnom mjestu.

Uzeti u obzir prilikom razmještanja oznaka [56]:

- Komunikacijske smetnje,
 - Udaljenosti čitača,
 - Tolerancija na visoke temperature,
 - Pritisak tereta uslijed skladištenja,
 - Trajanje baterije,
 - Mobilnosti,
 - Lokacija čitača, blizina pristupa podatkovnoj mreži,
 - Struja, odgovarajući napon,
 - Podaci, Wi-Fi mreža treba podržavati prijem i slanje podataka.
-
- **Analiza pametne radne stanice (S1) rezanja profila**

U ovom poglavlju će se analizirati učinak dodavanja RFID oznaka na profile, palete, valjčaste transportere i dizalice [56, 112, 113, 114].

U razmatranje simulacije uzet će se slijedeće pretpostavke:

- Na skladištu prije ulaska u proces rezanja profila pripremljen odgovarajući broj profila,
- Na profile stavljene RFID oznake,
- RFID čitač registrira sve oznake i odmah uspostavlja ulazne rezultate stanja i tipa i broja profila koji ulaze u radnu stanicu (S1),
- Na valjčasti transporter do stroja za rezanje profila idu samo profili koji će ići na panel liniju,
- Brzina rezanja (800mm/min),
- Udaljenost od RFID oznaka i RFID čitača manje od 90m,
- Duljina linije 20m, udaljenost od oznake na profilima do RFID čitača manje od 90m.

Kako autorica nije u mogućnosti prikupiti stvarne podatke (pokusi) stoga se za simulaciju rada RFID može koristiti matematički izračun [56, 112].

$$PL(d)[dB] = PL(d_0) + 10 n \log(d) + X_\sigma \quad (12)$$

gdje je:

- $PL(d)[dB]$ slabljenje signala u dB koje slabi s povećanjem udaljenosti d ,

- $PL(d_0)[dB]$ je slabljenje signala u dB s obzirom na referentnu udaljenost d_0 ,
- n je izračunata vrijednost koja minimizira razliku minimalne kvadratne pogreške između modela i empirijskih rezultata,
- X_σ je Gaussova varijabla sa srednjom nulom i standardnom devijacijom σ ,

Uzimajući u obzir model i korištenje RSS-a kao ulaza, udaljenost d može se dobiti iz izraza:

$$d = 10^{\frac{RSS - RSS_{d_0}}{10 \times n}} \quad (13)$$

Kako navodi istraživanje, kod prenošenja signala u zatvorenom prostoru prisutna je buka što može uzrokovati netočnosti u prijenosu signala, stoga se predlaže filtriranje buke Kalman filtrom [56, 109, 112].

Izraz Kalmanov filtra za prijenos signala:

$$x_t = A_t x_{t-1} + B_t u_t + e_t \quad (14)$$

gdje su x_t i (x_{t-1}) trenutno i prethodno stanje, respektivno, A je transformacijska matrica, u_t je kontrolni ulaz, B je model upravljačkog ulaza, a e je buka.

RFID oznaka ostaje na profilu dok se događa proces rezanja, istovremeno se događa konfiguracija sustava u bazi podataka, bilježi se aktivnost i aktivnost odmah postaje vidljiva operateru.

Operater na slijedećoj radnoj stanici ima odmah informaciju da segment stiže, tj. ukoliko zbog zauzetosti stroja nije u mogućnosti propustiti segment do određenog radnog mjesta, šalje ga na međuskladište dok slijedeća radna stanica ne bude spremna za aktivnost.

Za računalno sučelje predlaže se korištenje *Siemens Simatic IT* [101, 102].

Za 9 profila (na panelu) utvrđeno vrijeme ciklusa iznosi 75.55 min / po panelu.

U postojećem procesu profili se nakon napuštanja radne stanice (S1) odlažu na međuskladište (MS1) dok se vizualno ne utvrdi stanje izvršenih aktivnosti i definira koja je slijedeća radna stanica na koju profili trebaju biti transportirati.

Korištenjem RFID oznaka operater ima trenutnu informaciju o brzini odvijanja procesa rezanja, stanju broja profila koji su prošli kroz radnu stanicu, te mjestu slijedećeg koraka u tehnološkom procesu na koji profili trebaju biti usmjereni.

Sa skraćenim vremenom odlaganja na međuskladište (MS1) profili se usmjeravaju na radnu stanicu (S4) namještanje i zavarivanje profila.

Procjena vremena transporta valjčastim transporterom između radne stanice (S1) i radne stanice (S4) a sa reduciranim vremenom međuskladištenje (MS1) iznosi 2 sata.

Brzina valjčastog transportera 0,3m/s s okretanjem od 14s/90°.

- **Analiza pametne radne stanice (S2) označavanja, obrade rubova i rezanja limova**

U razmatranje simulacije uzele su se slijedeće pretpostavke:

- Na skladištu prije ulaska u proces rezanja obilježavanja, obrade rubova i rezanja limova pripremljeni limovi,
- Na limove stavljene RFID oznake,
- RFID čitač registrira sve oznake i odmah uspostavlja ulazne rezultate stanja i tipa i broja limova koje treba rezati i koji ulaze u radnu stanicu (S2),
- Na valjčasti transporter do dizalice, te do stroja za rezanje limova odvija se proces nadalje prema panel liniji,
- Brzina rezanja (600mm/min),
- Udaljenost od RFID oznaka i RFID čitača manje od 90m.

RFID oznaka ostaje na limu dok se događa proces rezanja, istovremeno se događa konfiguracija sustava u bazi podataka, bilježi se aktivnost i aktivnost odmah postaje vidljiva operateru. Operater na slijedećoj radnoj stanici ima odmah informaciju da izrezani lim stiže, tj. ukoliko zbog zauzetosti stroja nije u mogućnosti propustiti segment do određenog radnog mjesta šalje ga na međuskladište dok slijedeća radna stanica ne bude sprema za aktivnost.

Za obradu rubova lima ukupno vrijeme ciklusa iznosi 75.76 min dok za rezanje lima vrijeme ciklusa iznosi 18,82 min, ukupno vrijeme ciklusa iznosi 96.58min.

U postojećem procesu izrezani limovi se nakon napuštanja radne stanice (S2) odlažu na međuskladište (MS2) dok se vizualno ne utvrdi stanje izvršenih aktivnosti i definira koja je slijedeća radna stanica na koju limovi trebaju biti transportirati (8 sati).

Korištenjem RFID oznaka operater ima trenutnu informaciju o brzini odvijanja procesa rezanja, stanju broja limova koji su prošli kroz radnu stanicu, te mjestu slijedećeg koraka u tehnološkom procesu na koji profili trebaju biti usmjereni.

Bez odlaganja na međuskladište (MS2) limovi se usmjeravaju na radnu stanicu (S3) i takt panel linije. Prijenos panela vrši se mosnom magnetnom dizalicom.

Procjena vremena transporta dizalicom i odlaganje na stol između (S2) i (S3) a sa skraćenim međuskladištenjem na (MS2) iznosi 2 sata.

Brzina valjčastog transportera 0,3m/s s okretanjem od 14s/90°.

- **Analiza pametne radne stanice (S3) i takt panel linije**

U razmatranje simulacije uzet će se slijedeće pretpostavke:

- Na limove stavljene RFID oznake,
- RFID čitač registrira sve oznake i odmah uspostavlja ulazne rezultate stanja i tipa i broja limova koje treba zavariti na panel liniji, radnoj stanici (S3),
- Na valjčasti transporter koji je ujedno i podloga za zavarivanje na panel liniji idu samo limovi koji će se zavariti u panel,
- Brzina zavarivanja (928mm/min),
- Udaljenost od RFID oznaka i RFID čitača manje od 90m.

RFID oznaka ostaje na limu dok se događa proces zavarivanja, istovremeno se događa konfiguracija sustava u bazi podataka, bilježi se aktivnost i odmah postaje vidljiva operateru. Operater na slijedećoj radnoj stanici ima odmah informaciju da zavareni panel stiže, tj. ukoliko zbog zauzetosti stroja nije u mogućnosti propustiti segment do određenog radnog mjesta šalje ga na međuskladište dok slijedeća radna stanica ne bude spremna za aktivnost.

Za zavarivanje limova u panel ukupno vrijeme ciklusa iznosi 129 min / po panelu.

U postojećem procesu zavareni paneli odlažu se na međuskladište (MS2) dok se vizualno ne utvrdi stanje limova, količina i slijedeća radna stanica na koju trebaju biti poslani limovi.

Izrezani limovi se nakon napuštanja radne stanice (S2) odlažu na međuskladište (MS2) dok se vizualno ne utvrdi stanje izvršenih aktivnosti i definira koja je slijedeća radna stanica na koju limovi trebaju biti transportirati.

Korištenjem RFID oznaka operater ima trenutnu informaciju o brzini odvijanja procesa zavarivanja, stanju broja panela koji su prošli kroz radnu stanicu, te mjestu slijedećeg koraka u tehnološkom procesu na koji paneli trebaju biti usmjereni.

Bez odlaganja na međuskladište (MS2) limovi se usmjeravaju na radnu stanicu (S3) i takt panel linije. Prijenos panela vrši se mosnom magnetnom dizalicom.

Procjena vremena transporta dizalicom i odlaganje na stol između (S2) i (S3) uz skraćeno međuskladištenje (MS2) iznosi 2.6 sati.

Brzina valjčastog transportera 0,3m/s s okretanjem od 14s/90°.

- **Analiza pametne radne stanice (S4) namještanje i zavarivanje profila**

U razmatranje simulacije uzet će se slijedeće pretpostavke:

- Na profile stavljene RFID oznake,
- RFID čitač registrira sve oznake i odmah uspostavlja ulazne rezultate stanja i tipa i broja profila koje treba zavariti na panel liniji radnoj stanici (S4),
- Brzina označavanja (3800mm/min),
- Udaljenost od RFID oznaka i RFID čitača manje od 90m.

Za zavarivanje profila na panel ukupno vrijeme ciklusa iznosi 108.46 min / po panelu.

U sensoriranom okruženju nakon rezanja limovi se odmah šalju na slijedeću radnu stanicu pošto operater ima već informaciju o tome koji strukturni elementi još trebaju biti zavareni na panel poput ukrepa, traka, koljena i sl.

Skraćenim boravkom na međuskladištu (MS3) radi dodatne provjere kvalitete izrade, paneli se usmjeravaju dalje na slijedeću radnu stanicu. Procjena vremena transporta podnim valjčastim transporterom i sa skraćenim boravkom na međuskladištu (MS3) iznosi 1.6 sati.

Brzina valjčastog transportera 0,3m/s s okretanjem od 14s/90°.

U tablici 5.12 prikazana su vremena trajanja procesa u sensoriranom proizvodnom procesu.

Tablica 5.12 Ukupno trajanja procesa korištenjem RFID tehnologije

Radna stanica	Opis	Ulazni podaci / vrijeme ciklusa (min)	Vrijeme ciklusa (min)	Ukupno vrijeme procesa (min)
S1	Rezanje profila	76	72.02	72.02
S2	Obilježavanje, obrada rubova i rezanje limova	98	96.58	96.58
MS1	Priprema profila/ međuskladište	8 sati	8 sati	2 sata
MS2	Priprema limova/ međuskladište	8 sati	8 sati	2.6 sati
S3	Panel linija	130.8	129	129
S4	Pozicioniranje i zavarivanje profila	110	108.46	108.46
S5	Završetak linije panela	96	96	96
MS3	Međuskladište	8 sati	8 sati	1.6 sati
Sveukupno vrijeme procesa		32.36 sati	32.51 sati	15.11 sati

Prema prikazanim rezultatima u tablici 5.12 može se zaključiti slijedeće:

- 1) Uočava se znatno ubrzanje odvijanja procesa i skraćanje trajanja procesa izrade ukrijepljenih panela sa smanjenjem potrebnog broja operatera i smanjenjem utroška radnih sati na brojanje stanja segmenata trupa na tri međuskladišta.
- 2) Ciljano ukupno vrijeme trajanja izrade ukrijepljenih panela od početnih 32 sata i 51 min smanjeno je na *15 sati i 11 min*, uz zadržavanje inicijalnih aktivnosti na pojedinim radnim stanicama proizvodnog procesa u radionici.

Primarni cilj poboljšanja, ubrzanja i unaprjeđenja postojećeg tehnološkog procesa je postignut, ostvareno je skraćanje ukupnog vremena trajanja procesa međuskladištenja sa 24 sata na *6 sati i 20 min.*

Navedeni prijedlog i metodologija poboljšanja, unaprjeđenja i skraćanja trajanja tehnološkog procesa predlaže se za primjenu u brodogradilištu odnosno primijeniti odabrani element koncepta *Brodogradnja 4.0* prema opisanoj metodologiji.

Time je primarni cilj unaprjeđenja značajki tehnološkog procesa u radionici postignut, ostvareno je ukupno skraćanje vremena trajanja procesa sa početnih 32 sata i 51 min na *15 sati i 11min.*

5.16 FAZA 5 - Zaključak provedene analize i dokumentiranje rezultata

Temeljem provedene analize i razmatranja prijedloga unaprjeđenja tehnološkog procesa u brodograđevnoj proizvodnoj radionici, a kako bi se ostvarili postavljeni ciljevi istraživanja predlaže se primjena slijedećih rješenja:

- Primjena RFID tehnologije za praćenje cjelokupnog tehnološkog procesa u radionici; RFID oznaka, čitača antena, senzora i računalno povezanog sustava praćenja segmenata trupa, strojeva, uređaja, transportnih sredstava i dizalica postiže se cjelovito praćenje tijeka materijala i stanja materijala na međuskladištima, njihova točna pozicija u tehnološkom procesu radionice.
- Podizanje brzine prijenosa Wi-Fi signala između oznaka, čitača, računala kako bi se ostvario prijenos informacija *u vremenu.*

Primjenom odrednice koncepta *progresivno RFID senzoriranje proizvodnog procesa* u radionici, ostvaruje se skraćanje trajanja tehnološkog procesa izrade ukrijepljenih panela sa 32 sata na *15 sati i 11 min;*

Ciljano ukupno vrijeme trajanja izrade ukrijepljenih panela od početnih 32 sata i 51 min smanjeno je na *15 sati i 11 min*, uz zadržavanje inicijalnih aktivnosti na pojedinim radnim stanicama proizvodnog procesa u radionici.

Broj operatera koji su nadzirali radne stanice proizvodnog procesa smanjuje se sa početnih 32 na ukupno 8, razmještenih uz ciljane module za prikupljanje i obradu podataka.

Dosadašnja istraživanja autorice pokazuju da je primjena digitalnih tehnologija među kojima je primjena senzoriranog tehnološkog procesa samo jedan od segmenta modernizacije brodogradilišta koje teži ostvariti koncept *Brodogradnja 4.0*.

Temeljem primjene RFID senzoriranog procesa omogućuje se kontrola nad procesom i vremenom ciklusa svakog pojedinog radnog mjesta. Povezivanje bežične senzorske mreže korištenjem RFID tehnologije predstavlja platformu koja svakom operateru te voditelju radionice omogućuje praćenje stanja u radionici i napredak izvršenja proizvodnih naloga u odnosu na planirane aktivnosti.

Projektno rješenje predložene primjene RFID tehnologije kao odabranog elementa koncepta *Brodogradnja 4.0* predstavlja osnovu za unaprjeđenje cjelokupnog tehnološkog procesa za postizanje najviše tehnološke razine.

Zaključena je i opravdana primjena predložene metodologije implementacije RFID tehnologije na primjeru realnog problema postojećeg brodograđevnog procesa koji je sastavni dio svakog brodogradilišta.

6. ZAKLJUČAK

U radu je detaljno predstavljen koncept nove industrijske revolucije u brodogradnji nazvan *Brodogradnja 4.0*. *Brodogradnja 4.0* predstavlja globalni imperativ, koncept potpuno digitaliziranog cjelokupnog brodograđevnog procesa, od projektiranja, nabave, izrade, montaže i cjeloživotnog lanca vrijednosti broda.

Transformacija brodograđevnog sektora prema konceptu *Brodogradnja 4.0* vrlo je složen i kompleksan proces koji iziskuje velika financijska ulaganja, stoga je od presudne važnosti zakoračiti prema novim tehnologijama razvijajući strategiju usporedbe postojećeg stanja i napretka koji donosi buduća digitalizirana industrija.

U radu je osnovan prijedlog metodologije optimalnog postupka implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* na brodograđevni proces. Primjenom predloženog rješenja poboljšanja i modernizacije tehnološkog procesa brodogradilišta želi se dokazati primjenjivost korištenja digitalnih tehnologija te prikazati njihov doprinos poboljšanju funkcioniranja i neometanog tijeka brodograđevnog tehnološkog procesa.

U prvom poglavlju predstavljen je problem i predmet istraživanja ovog rada, cilj i hipoteza istraživanja, metodologija istraživanja i prijedlog očekivanog znanstvenog doprinosa te primjene rezultata istraživanja.

U drugom poglavlju cjelovito je predstavljen koncept *Industrije 4.0* kao temelja primjenjivog prema konceptu *Brodogradnja 4.0*, opisani su odabrani elementi koncepta.

U trećem poglavlju predstavljeno je vrednovanje razine industrijske zrelosti brodograđevne industrije kroz anketu stručnjaka, kako bi se utvrdilo trenutno stanje brodograđevne industrije u cijelosti. U analizi su sudjelovali stručnjaci iz svih grana brodograđevnog procesa..

Utvrđena je tehnološka razina tvrtki iz brodograđevnog sektora te su se formirale smjernice prema primjeni odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* kao najvišoj tehnološkoj razini.

U četvrtom poglavlju predstavljena je metodologija za odabir poslovnog rješenja prema *Brodogradnji 4.0*, gdje se primjenom analitičkog hijerarhijskog procesa (eng. *AHP*) i provjerom stabilnosti predloženog rješenje metodom analize osjetljivosti, definirao prijedlog posloženog postupka implementacije odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0*. Definirali su se projektni zahtjevi, kriteriji, ograničenja te odabrani elementi koncepta *Brodogradnja 4.0*, koji su se korištenjem analitičkog hijerarhijskog procesa međusobno uspoređivali kako bi se dobio najizgledniji postupak implementacije

odabranih elemenata koncepta. Kao najviša razina hijerarhijskog razmatranja postavljen je cilj, potom su se međusobno uspoređivali kriteriji pa potom odabrani elementi koncepta prema svakom kriteriju i međusobno svaki element sa svim prema svakom kriteriju.

Potvrda stabilnosti provjerena je primjenom analize izvedbene osjetljivosti, analize dinamičke osjetljivosti, analize dijagramom stupnja osjetljivosti i analize dijagramom sučeljavanja, gdje je prikazana usporedba odabranih elemenata koncepta. Rješenje je stabilno te prihvaćeno kao podloga za primjenu u bilo kojem proizvodnom procesu.

U analizi i istraživanju korišten je računalni programa *Expert Choice software*.

U petom poglavlju predstavljena je metodologija osnivanja primjene koncepta *Brodogradnji 4.0* korištenjem metode simulacijskog modeliranja, gdje se izradom simulacijskog modela analizirao postojeći tehnološki proces u odabranom segmentu brodograđevnog procesa, a potom je dan prijedlog unaprjeđenja kroz primjenu odabranog elementa koncepta progresivno RFID senzoriranje na konkretnom primjeru brodogradilišta srednje veličine u segmentu proizvodnje.

Primjenom predložene metodologije, odabrano projektno rješenje je dokazalo opravdanost implementacije predloženog elementa koncepta na segmentu brodograđevnog tehnološkog procesa što dokazuje temelj i svrhu ovog istraživanja.

U analizi je korišten računalni program „*Technomatic Plant Simulation 15*“ te teoretske postavke računalnih modela i programa za bežično povezivanje sustava.

Analiziran je proces izrade ukrijepljenih panela odabrane skupine materijala za grupe nadgrađa u radionici osmišljenoj kao pametnom senzoriranom procesu.

Cilj primjene opisane metodologije korištenjem računalnih programa analitičkog hijerarhijskog procesa (*eng. AHP*) te simulacijskog modeliranja (*eng. Simulation Modeling*) omogućuje se utvrđivanje tijeka odvijanja procesa a prije nego što se on uopće dogodio. Ova metodologija uz digitalizaciju cjelokupnog proizvodnog procesa omogućuje na vrijeme uočavanje „uskih grla“ ali i pomaže pri definiranju prijedloga unaprjeđenja i poboljšanja do ispunjenja zacrtanih ciljeva, a to je postizanje najviše tehnološke razine segmenata brodograđevnog procesa.

Primjena odabranih elemenata koncepta *Brodogradnja 4.0* na brodograđevni proces predstavlja povezivanje i cjelovitost procesa u radionici proizvodnog procesa kako bi se stvorila suradnja odnosno sinkronizirali različiti procesi za globalno unaprjeđenje procesa.

Primjenom razmjene informacija u stvarnom vremenu teži se povezati proizvodni proces i korporativni sustav projektiranja, nabavljanja, planiranja i proizvodnje.

Kako je proces razmjene informacija u vremenu opisan na primjeru dijela brodograđevnog procesa, očekuje se da bude primjenjiv prema napretku procesa, razmjeni informacija i materijala kroz proces. Očekuje se transparentna sljedivost međuskladištenja opreme i drugih elemenata u proizvodnom procesu.

Kao nastavak ovog istraživanja predlaže se daljnje korištenje predložene metodologije i razvoj digitalizacije brodograđevnog tehnološkog procesa na globalnoj razini.

Nadolazeće aplikacije za obradu podataka u brodogradilištu organiziranom prema konceptu *Brodogradnja 4.0* odnosno *Brodogradilište 4.0*, treba iskoristiti za potrebe pametne potrošnje energije, poboljšanje sigurnosti i kontrole radne snage te u stvarnom vremenu kibernetско-fizičkih sustava (*eng. Cyber-Physical System*) ostvariti optimizaciju poslovanja i podići konkurentnost na svjetskom tržištu.

Ovim doktorskim radom ostvareni su slijedeći ciljevi:

- 1) Razvijena je posebno osmišljena metodologija za odabir optimalnog postupka implementacije koncepta *Brodogradnja 4.0*, temeljena na modelima višekriterijskog odlučivanja i optimizacije. Rezultati istraživanja i analize kroz anketu i primjenu višekriterijskog odlučivanja daju odgovor na pitanje kako i kojim redoslijedom, odnosno kojim postupkom vršiti implementaciju koncepta *Brodogradnja 4.0*.
- 2) Razvijena je posebno osmišljena metodologija implementacije odabranog elementa koncepta; progresivno RFID senzoričanje primjenom metode simulacijskog modeliranja na odabranom segmentu brodograđevnog procesa. Rezultati istraživanja i analize kroz primjenu simulacijskog modeliranja daju odgovor na pitanje kako i kojim redoslijed odnosno kojim procesom vršiti implementaciju RFID senzoričanja segmenta brodograđevnog procesa kako bi ga učinili pametnim i povezanim.

Ovim je doktorskim radom potvrđena je hipoteza, da je: *moгуće razviti model metodologije za odabir optimalnog postupka implementacije koncepta Brodogradnja 4.0 temeljen na metodama višekriterijskog odlučivanja i simulacijskog modeliranja.*

Pregledom i istraživanjem dosadašnje teorije i prakse uočeno je da se u brodogradnji računalno podržane metodologije nedovoljno koriste, posebno se to odnosi na analiziranje i projektiranje optimalnog postupka implementacije koncepta *Brodogradnja 4.0* što je predstavljalo glavnu motivaciju za ovo istraživanje.

Nadalje, preporuča se da buduća linija istraživanja obuhvati sve ostale odabrane elemente koncepta korištenjem pametnog sustava za pružanje velikog broja novih usluga u brodogradilištu. Nadolazeće aplikacije za obradu podataka u brodogradilištu organiziranom prema konceptu *Brodogradnja 4.0* treba iskoristiti za potrebe pametne potrošnje raspoloživih resursa, suradnje s dobavljačima opreme, kooperantima, klasifikacijskim društvima, poboljšanju sigurnosti i kontrole radne snage te razmjenu informacija u stvarnom vremenu primjenom odabranih elemenata koncepta čime se može ostvariti optimizacija i unaprjeđenje poslovanja te unaprijediti konkurentnost na svjetskom tržištu.

LITERATURA:

- [1] Saaïd M.H.M., Mohamad A.R. 2018, "*Technology Trends in Shipbuilding & Ship Repair Towards Industry 4.0*", Malaysian Foresight Institute, <http://www.myforesight.my/2018/07/10/technology-trends-in-shipbuilding-ship-repair-towards-industry-4-0/>.
- [2] Conference, 2015, "*Shipbuilding 4.0: DINAMIZACIÓN DE LA CAPACIDAD INNOVADORA DEL SECTOR NAVAL GALLEGO*" Ferrol, Spain.
- [3] Trstenjak M., Čosić P. 2017, "*Process Planning in Industry 4.0 Environment*", Procedia Manufacturing, Volume 11.
- [4] Kagermann. H., Wahlster W., Helbig J., 2013, "*Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*", Report Berlin: Industrie 4.0 Working Group of Acatech.
- [5] „*Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*”, Final report of the Industrie 4.0 Working Group, National Academy of Science and Engineering, Germany, 2013.
- [6] Hughes D. 2016, "*Shipping Commits to CO2 Roadmap*", The Business Times, Singapore.
- [7] Digital Mariner, 2017, "*Shipbuilding 4.0: the digital thread in shipbuilding technology*", Siemens Enthusiast, <http://community.plm.automation.siemens.com>.
- [8] Roland Berger 2015. "*Industry 4.0 - The New Industrial Revolution How Europe Will Succeed*". Report. Munich: Roland Berger Strategy Consultants.
- [9] Rivas A.R., 2018, "*Navantia's Shipyard 4.0 model overview*", Ship Science & Technology, 11(22), 77-85-January 2018, DOI: 10.25043/19098642.165.
- [10] Hyun L., 2015., "*Strategies for improving the competitiveness of the Korean shipbuilding industry : Case study of Hyundai Heavy Industries*", World Maritime University, Sweden.
- [11] <http://www.worldcruise-network.com>.
- [12] Pires F., Lamb T., Souza C., 2009, "*Shipbuilding performances benchmarking*", International Journal of Business Performance Management 11(3), DOI: 10.1504/IJBPM.2009.024372.
- [13] EU Study Competitiveness and Benchmarking in the Field of Marine Equipment (ETD/98/50209), Annex 3, Process and Technology Portfolios, Public Report 2000.
- [14] Schnitger Corporation, 2021, "*The Marine Industry in 2030 - Getting to Shipyard 4.0*", www.schnitgercorp.com,
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Fourth_Industrial_Revolution.

-
- [16] Drath R., Horch A., 2014, "*Industrie 4.0: Hit or Hype?*" IEEE Industrial Electronics Magazine 8 (2): 56-58.
- [17] Merkel, A., 2015, „in *Börsenzeitung Die Welt wartet nicht auf uns*“. Retrieved on <https://www.boersenzeitung.de/index.php?li=1&artid=2015070049&titel>.
- [18] Naya S., 2017, "*Industry 4.0. An Opportunity for the Relationship Between University and Shipbuilding in the Future*", COPINAVAL 2017: Proceedings of the 25th Pan-American Conference of Naval Engineering—COPINAVAL, USA, pp 169-177.
- [19] Fraga-Lamas P. at all, 2016, "*Smart Pipe System for a Shipyard 4.0*", Sensors, Spain.
- [20] Hribernik K., 2016, „*Industry 4.0 in the Maritime Sector*“, SEA, Tokyo, Japan.
- [21] "*Shiffbau 4.0 als Chance für die Zukunft*", 2015. konferencija GO-3D, Rostock, Njemačka.
- [22] Muzyk B., 2018., "*Welch Trends den Schiffbau aktuell umtreiben*", NEXT, <https://www.ke-next.de/specials/schiffbau/welche-trends-den-schiffbau-aktuell-umtreiben-375.html>.
- [23] Maritime Agenda 2025, „*The Future of Germany as a maritime industry hub*“, Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, March 2017.
- [24] „*Study on Industrial and Technological Competences in the Naval Sector*“, Executive Summary, 2015.
- [25] <https://www.maritimes-cluster.de/>
- [26] Balansingham K., 2016, "*Industry 4.0: Securing the Future for German Manufacturing Companies*", Utrecht: University of Twente.
- [27] PricewaterhouseCoopers (PwC). 2016, „*Global Industry 4.0 Survey. Industry 4.0: Building the Digital Enterprise*“, Technical Report; PwC: London, UK.
- [28] <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industrial-manufacturing/digital-supply-chain.html>.
- [29] Kennedy S., 2015, "*Made in China 2025*", Center for Strategic & International Studies, <http://csis.org/analysis/made-china-2025>.
- [30] Yuyang L., 2014, "*Big Data herald era of smart ships*", China Economic Net, China.
- [31] China State Shipbuilding Corporation (CSSC), 2015, "*CSSC Developing a Smart Ship for the Future*", Shanghai, China.

-
- [32] Fortunato da Costa T.M., at all. 2017., "*Hotlog: An IoT-based embedded system for intelligent tracking in shipyards*", IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017., Beijing, China.
 - [33] Min K.S., 2008., "*Automation and Control Systems Technology in Korean Shipbuilding Industry: The State of the Art and the Future Perspectives*", Proceedings of the 17th World Congress the International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6-11, 2008.
 - [34] Ángel Recamán Rivas, 2018., "*Navantia Shipyard 4.0 model overview*", Ship Science & Technology - Vol.11-nº22 - (77-85), Cartagena, Columbia.
 - [35] Evans G., 2018. „*The digital naval shipyard*“, Naval Technology, <https://www.naval-technology.com/features/digital-naval-shipyard/>.
 - [36] Flexera, 2020, "Digital Transformation Planning Report".
 - [37] „*Industry 4.0, Capturing value at scale in discrete manufacturing*“, <https://www.mckinsey.com/>, 2019.
 - [38] Digital Mariner, 2017, "*Shipbuilding 4.0: the digital thread in shipbuilding technology*", Siemens Enthusiast, <http://community.plm.automation.siemens.com>.
 - [39] Navantia's web page. Available online: <https://www.navantia.es/index.php> (accessed on 31 October 2016).
 - [40] Rowse T., 2021., „*What is digital shipyard?*“, <https://www.rowse.co.uk/blog/post/what-is-a-digital-shipyard>.
 - [41] Worrall L, Spoehr J., 2021., „*Naval Shipbuilding and Industry 4.0, Building the Value Chain and Industry Capability*“, Flinders university, Australian Transformation Institute.
 - [42] Concha G., 2023, „*What is cybersecurity by design in the shipbuilding industry?*“, <https://cybersecurity.aeromarine.es/cybersecurity-by-design/>, January 2023.
 - [43] Lee Jay, Hung K., Shanhu Y., 2014, "*Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment*", Procedia CIRP 16:3-8.
 - [44] Gandomi A., Haider M. 2014. "*Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics*", International Journal of Information Management 35 (2) (2015) 137-144, <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2014.10.007>.
 - [45] Vargas D. at all, 2020, "*Augmented Reality for Future Research Opportunities and Challenges in the Shipbuilding Industry: A Literature Review*", 10th Conference on Learning Factories, CLF2020, Procedia Manufacturing 45 (2020) 497–503.
 - [46] Ziolkowski M., Dyl T., 2020, "*Possible Applications of Additive Manufacturing Technologies in Shipbuilding: A Review*", Machines 2020, Section Advanced Manufacturing.
 - [47] <https://agvininternational.com/automated-guided-vehicles-its-a-global-trend/>.
 - [48] Beifert A., Gerlitz L., Prause G., 2018. "*Industrie 4.0: Neue Perspektiven für Smart Manufacturing im Schiffbau*", Conference: WiWiTa 2018., Wismar, Germany.

-
- [49] <https://www.esss.co/en/blog/simulation-prototyping-shipbuilding-industry/>
 - [50] Lee D. 2002., „*Robots in the shipbuilding industry*“, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 30, Issue 5, October 2014, pages 442 – 450.
 - [51] Zhao-hui W., at all, 2017., „*Survey on Flexible Shipbuilding Technologies for Curved Ship-Blocks*“, December 2017, Procedia Engineering 174(2):800-807.
 - [52] <https://www.floorganise.com/knowledgebase/methodology/Project-planning-in-a-shipyard.>
 - [53] Terberg.com, (2019). „*Roadmap to autonomous operation*“, Accessed 31 July 2020.
 - [54] Interreg, 2020, „*Road to Shipyard 4.0*“, The state of play, a brief history of maritime developments, and a future roadmap Focusing on the Baltic Sea and Shipyards, Ecoprodigi, Research Report, University Turku, Finland.
 - [55] Pessl E., Sorko S.R., Mayer B., 2017, "*Roadmap Industry 4.0 - Implementation Guidelines for Enterprises*", International Journal of Science, Technology and Society, 2017;5(6):193-202, ISSN:2330-7412.
 - [56] Fraga-Lamas at all., 2018., "*Enabling Automation Event Detection for the Pipe Workshop of the Shipyard 4.0*", Published in 56th FITCE Congress 2017., DOI:10.1109/FITCE.2017.8093002.
 - [57] Jürgens S., 2019., "*Asset-Tracking for Lürsenn*", RFID and GPS based asset tracking solution for Luerssen, IoT Solutions , RFI & Wireless IoT, April 2019.
 - [58] Geissbauer R. at all, PwC 2020, "*Digital Factories 2020 Shaping the future of manufacturing*", www.pwc.de, 2017. Germany.
 - [59] K. Suri, A. Cuccuru, J. Cadavid, S. Gérard, W. Gaaloul, S. Tata 2017, „*Model-based development of modular complex systems for accomplishing system integration for industry 4.0*“, 5th International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development (MODELSWARD 2017) (2017), <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01474906>.
 - [60] Stankovic J, Wood A., He T. 2010. "*Realistic applications for wireless sensor networks*", Theoretical aspects of distributed computing in sensor networks", 2010;835-863.
 - [61] Giallanza A., at all., 2021, „*Industry 4.0: advanced digital solutions implemented on a close power loop test bench*“, International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing,
 - [62] Stefanini R. at all, 2022., „*Industry 4.0 and intelligent predictive maintenance: a survey about the advantages and constraints in the Italian context*“, Journal of Quality in Maintenance Engineering, Volume 29 Issue 5.
 - [63] Oztemel E., Gursev S, D. 2018, "*Literature review of Industry 4.0 and related technologies*", The Business Times.

-
- [64] M. Hermann, T. Pentek, B. Otto. 2015, "*Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*", Business Engineering Institute St. Gallen, Technische Universität Dortmund, Germany.
- [65] <https://www.techtarget.com/searchcio/definition/decision-support-system>.
- [66] Kalman R. E., 2022., „*Design of a Self-Optimization Control System*“, Journal of Fluids and Engineering, Volume 80, Issue 2.
- [67] Bocker at all, 2007., *Self-Optimization as a Framework for Advanced Control System*", IECON 2006 – 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics.
- [68] Ramirez-Peña M. at all, 2020., "*Assessing Sustainability in the Shipbuilding Supply Chain 4.0: A Systematic Review*", Sustainability 2020, 12(16) 6373.
- [69] Y. Lu, 2017., "*Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues*", Journal of Industrial Information Integration 6 (2017)1-10, <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>.
- [70] D. P. Perales, F. A. Valero, A. B. García, 2018. "*Industry 4.0: A Classification Scheme*". In: Viles E., Ormazábal M., Lleó A. (eds) Closing the Gap Between Practice and Research in Industrial Engineering. Lecture Notes in Management and Industrial Engineering. Springer, Cham (2018) 343-350, https://doi.org/10.1007/978-3-319-58409-6_38.
- [71] Alfredo A., Li Y., Chen W., Zhan Z., 2015, "*Industry 4.0 with Cyber-Physical integration: A design and manufacture perspective*", 21st International Conference on Automation and Computing (ICAC), Glasgow, UK.
- [72] Pessl E., Sorko S.R., Mayer B., 2017, "*Roadmap Industry 4.0 - Implementation Guidelines for Enterprises*", International Journal of Science, Technology and Society, 2017;5(6):193-202, ISSN:2330-7412.
- [73] Beifert A., Gerlitz L., Gunnar P., 2017, „*Industry 4.0 – for Sustainable Development of Lean Manufacturing Companies in the Shipbuilding Sector*“, Conference: 17th International Multidisciplinary Conference of Reliability and Statistics in Transportation and Communication “RelStat-2017, Riga.
- [74] <https://siemens.com/>, 2022.
- [75] Markman J. 2019., "*PTC Smartly Readies Factories For Their Digital Transformation*", Forbes magazine, Markman Capital Insight.
- [76] 2020. "*Digital Shipyard Market – Global Forecast 2030*".
- [77] <https://www.capgemini.com/>.
- [78] Kim H., Lee J.G., Lee S.S., Park J.H. 2003, "*A Simulation-based Shipbuilding System for Evaluation of Validity in Design and Manufacturing*", Conference: Systems, Man and

- Cybernetics, 2003. IEEE International Conference on, Volume: 1, DOI: 10.1109/ICSMC.2003.1243868.
- [79] Veža I., Mladineo M., 2016. "*INSEN - Projekt inovativno pametno poduzeće*", FESB, Split, Croatia.
- [80] Saaty, T. L., 1980. "*The Analytic Hierarchy Process*", ISBN: 0-07-054371-2. McGraw-Hill, Inc. USA.
- [81] Expert Choice, inc.: "*Expert Choice software 11*".
- [82] Schumacher A at all, 2016, "*A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity Manufacturing Enterprises*", Procedia CIRP, available at <http://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>.
- [83] Morales A.B., 2021, "*Towards a Shipyard 4.0: a case study on the intended utilization of digital transformation and Industry 4.0 mechanisms in a Colombian Shipyard*".
- [84] Sotano A. at all, 2020, "*Trends of Digital Transformation in the Shipbuilding Sector*".
- [85] Schumacher A. at all., 2015, "*A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises*", Procedia CIRP 52 (2016) 161 – 166.
- [86] Hübner M., 2013. "*Developing Smart Technologies for Productivity Improvement of European Small and Medium Sized Shipyards*", Center of Maritime Technologies e.V., Hamburg, Germany, FP7-SST-2013-5-2, 2013.
- [87] Weyer S., Meyer T., Ohmer M., 2016., "Future Modeling and Simulation of CPS-based Factories: and Example from the Automotive Industry", IFAC-PaperOnLine 49-31(2016)97-102.
- [88] D. Mourtzis, M. Doukas, D. Bernidaki, 2014, "*Simulation in Manufacturing: Review and Challenges*", Procedia CIRP 25 (2014)213-229, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.032>.
- [89] Rodič A., 2017, "*Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm*", Organizacija 50 (3) (2017) 193-207, <https://doi.org/10.1515/orga-2017-0017>.
- [90] J. Tupa, J. Simota, F. Steiner, 2017, "*Aspects of Risk Management Implementation for Industry 4.0*", Procedia Manufacturing 11 (2017) 1223-1230, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.248>.
- [91] "Siemens' Simatic IT Official Website. Available online: https://w3.siemens.com/mcms/mes/en/mes_suites/Pages/Default.aspx" (27 April 2018).
- [92] <https://www.plm.automation.siemens.com>
- [93] Kim H., Lee J.G., Lee S.S., Park J.H. 2003, "*A Simulation-based Shipbuilding System for Evaluation of Validity in Design and Manufacturing*", Conference: Systems, Man and Cybernetics, 2003. IEEE International Conference on, Volume: 1, DOI: 10.1109/ICSMC.2003.1243868.

- [94] E. R. Zúñiga, M. U. Moris, A. Syberfeldt, 2017, „*Integrating simulation-based optimization, lean, and the concepts of industry 4.0*“, Winter Simulation Conference (WSC), Las Vegas, NV,(2017) 3828-3839, <https://doi.org/10.1109/WSC.2017.8248094>.
- [95] <https://resources.sw.siemens.com/en-US/analyst-report-marine-industry-in-2030-the-smart-digital-shipyard>.
- [96] Fraga-Lamas at all., 2018., „*Enabling Automation Event Detection for the Pipe Workshop of the Shipyard 4.0*“, Published in 56th FITCE Congress 2017., DOI:10.1109/FITCE.2017.8093002.
- [97] Matulja T. 2008, „*Hijerarhijsko modeliranje kao osnova metodologije projektiranja optimalnog rasporeda proizvodnih površina brodogradilišta*“, doktorski rad, Tehnički fakultet Rijeka, Hrvatska.
- [98] Hadjina M., 2008, „*Simulacijsko modeliranje kao osnova metodologije projektiranja brodograđevnog proizvodnog procesa*“, doktorski rad, Tehnički fakultet Rijeka, Hrvatska.
- [99] Weyer S., Meyer T., Ohmer M., 2016., "Future Modeling and Simulation of CPS-based Factories: and Example from the Automotive Industry", IFAC-PaperOnLine 49-31(2016)97-102.
- [100] Drucker N., Campbell K., 2015., "An Adaptive PLanning Tool for Ship COnstruction Warehouse Capacities", MODSIM World2015., Paper No.34.
- [101] Munin-Doce A., at all, 2020, „*Industrial Internet of Things in production environment of a Shipyard 4.0*“, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology“, 108, 47-59 (2020), Published 09 May 2020.
- [102] Weis A.A. at all, 2015, „*Tracking manufacturing resources with RFID technology: a case study for application in shipyard*“, Conference: A XX. Fiatal műszakiak tudományos ülészek előadásai - Proceedings of the XXth International Scientific Conference of Young Engineers At: Cluj-Napoca, Romania, 2015.
- [103] Cordeiro G. at all, 2019, „*Theoretical proposal of steps for the implementation of the Industry 4.0 concept*“, Brazilian Journal of Operations & Production Management 16 (2019), pp 166-179.
- [104] Stanić V., Hadjina M., Fafandjel N., Matulja T., 2018. "Toward Shipbuilding 4.0 - An Industry 4.0 changing the face of the Shipbuilding Industry", Shipbuilding: Theory and Practice of Naval Architecture, Marine Engineering and Ocean Engineering, Vol. 69 No. 3, 2018, UDC 629.5.081.
- [105] Wilson JS. 2004, „*Sensor technology handbook*“, Elsevier; 2004 Dec 21.
- [106] Mednis, A.; Zviedris, R. 2012, „*RFID communication: How well protected against reverse engineering?*“ In Proceedings of the Second International Conference on Digital Information Processing and Communications, Klaipeda City, Latvia, July 2012; pp. 59-61.
- [107] Nasuha M., Ustadi M. Shariffuddin M. 2015., "The Potential of Radio Frequency Identification (RFID) Technology Implementation in Malaysian Shipbuilding Industry", Journal of Transport System Engineering 2 : 1 (2015), 31-36.

- [108] Chen, M.; Zhang, Y.; Hu, L.; Taleb, T.; Sheng, 2015. „Z. Cloud-based wireless network: Virtualized, reconfigurable, smart wireless network to enable 5G technologies“. *Mob. Netw. Appl.* 2015, 20, 704–712.
- [109] Munin-Doce A., at all, 2020, „*Industrial Internet of Things in production environment of a Shipyard 4.0*“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108, 47-59 (2020), Published 09 May 2020.
- [110] Kim, M.Y.; Cho, H.S.; Kim, J. 2001, “Neural network-based recognition of navigation environment for intelligent shipyard welding robots. In *Proceedings of the 14th IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Maui, HI, USA, 29 October & 3 November 2001; pp. 446-451
- [111] Navarro, P.J., Muro L.S., at all, 2013, „ *Sensors systems for the automation of operations in the ship repair industry*“, *Sensors*, 2013, 13, 12345-12374.
- [112] Fraga-Lamas P. at all, 2021, “*Next Generation Auto-Identification and Traceability Technologies for Industry 5.0: A Methodology and Practice Use Case for the Shipbuilding Industry*”.

POPIS KRATICA

IoT	– Internet of Things
CPS	– Cyber-Physical System
DT	- Digital Twin
CS	- Cyber Security
BD	- Big Data
AM	- Additive Manufacturing
PA	- Predictive Analytics
AHP	– Analitički hijerarhijski proces
IT	– Informacijske tehnologije
RFID	– Radio Frequency IDentification
CC	– Cloud Computing
PLM	- Product Lifecycle Management
VR	- Virtual Reality
AR	- Augmented Reality
SA	- Sensitivity Analysis

POPIS SLIKA

Slika 3.1 Osnovi cilj istraživanja	29
Slika. 3.2 Reprezentativnost uzorka prema poslovanju tvrtke.....	32
Slika. 3.3 Raspodjela odgovora prema veličini tvrtke (broju zaposlenika).....	32
Slika. 3.4 Uspješnost tvrtke prema visini godišnjih prihoda izražena u.....	33
Slika. 3.5 Raspodjela ispitanika prema odjelu u tvrtki.....	33
Slika. 3.6 Raspodjela ispitanika prema radnom mjestu u tvrtki.....	34
Slika. 3.7 Raspodjela obrazovanosti ispitanika.....	34
Slika. 3.8 Raspodjela razvoja proizvoda/poslovnih rješenja u tvrtki.....	36
Slika. 3.9 Raspodjela razvoja proizvoda u tvrtki.....	38
Slika. 3.10 Raspodjela odgovora prema tehnologiji koja dominira u tvrtki.....	38
Slika. 3.11 Raspodjela odgovora prema upravljanju i kontroli procesa u tvrtki.....	39
Slika. 3.12 Raspodjela procesa kontrole kvalitete koji dominira u tvrtki.....	39
Slika. 3.13 Raspodjela planiranja procesa koja dominira u tvrtki.....	39
Slika. 3.14 Raspodjela upravljanja životnim ciklusom proizvoda u tvrtki.....	40
Slika. 3.15 Raspodjela tvrtki prema razini industrijskog razvoja.....	41
Slika. 3.16 Raspodjela primjene softverskih rješenja u tvrtkama.....	42
Slika. 3.17 Raspodjela važnosti vertikalne integracije u tvrtkama.....	42
Slika. 3.18 Raspodjela tvrtki prema razini stručnosti zaposlenika.....	43
Slika. 3.19 Raspodjela tehnoloških rješenja za sljedivost poslovnih procesa.....	43
Slika. 3.20 Razina integracije najvažnijih segmenata procesa.....	45
Slika. 3.21 Ljestvica elemenata koncepta prema prioritetima za implementaciju.....	49
Slika. 3.22 Ljestvica važnosti odabranih elemenata koncepta.....	50
Slika. 3.23 Početak implementacije koncepta <i>Brodogradnja 4.0</i>	51
Slika. 3.24 Procjena investicijskog troška za implementaciju	52
Slika. 3.25 Procjena vremenskog perioda za implementaciju koncepta.....	53
Slika. 3.26 Usporedba glavnih kriterija za implementacije koncepta.....	54

Slika 4.1 Blok dijagram predložene metodologije.....	59
Slika 4.2 Hijerarhijski model <i>AHP</i> procesa.....	63
Slika 4.3 Hijerarhijski <i>AHP</i> model.....	66
Slika 4.4 Izračun omjera težina kriterija pomoću <i>AHP</i> alata.....	67
Slika 4.5 Izračun lokalnih prioriteta elemenata koncepta prema svakom kriterija.....	73
Slika 4.6 Izračun ukupnih prioriteta pomoću <i>AHP</i> alata.....	75
Slika 4.7 Dinamička analiza osjetljivosti [<i>AHP Expert Choice software</i>].....	83
Slika 4.8 Analiza izvedbene osjetljivosti [<i>AHP Expert Choice software</i>].....	84
Slika 5.1 Osnovna struktura predložene metodologije.....	91
Slika 5.2 Tlocrt radionice za izradu ukrijepljenih panela	96
Slika 5.3 Grafički prikaz toka procesa i struktura metode.....	101
Slika 5.4 Simulacijski model radionice u softveru <i>Technomatic Plant Simulation</i>	105
Slika 5.5 Usporedba različitih identifikacijskih RFID tehnologija.....	115
Slika 5.6 Usporedba različitih identifikacijskih RFID tehnologija.....	119
Slika 5.7 Razmještaj RFID oznaka i čitača na radnim stanicama.....	122

POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Selekcija industrijskog razvoja u brodogradnji.....	37
Tablica 3.2 Preduvjeti za implementaciju koncepta <i>Brodogradnja 4.0</i>	55
Tablica 4.1 Odabrani elementi koncepta <i>Brodogradnja 4.0</i>	61
Tablica 4.2 <i>Saaty</i> -eva temeljna skala vrednovanja relativne važnosti.....	63
Tablica 4.3 Izračun omjera težina kriterija korištenjem <i>AHP</i> alata.....	68
Tablica 4.4 Redoslijed vrijednosti težine kriterija.....	69
Tablica 4.5 Ponderi odabranih elemenata koncepta u ovisnosti o kriterijima.....	71
Tablica 4.6 Redoslijed implementacije elemenata koncepta.....	80
Tablica 4.7 Redoslijeda implementacije odabranih elemenata koncepta.....	88
Tablica 5.1 Tehničke karakteristike strojeva za rezanje.....	98
Tablica 5.2 Parametri I takta linije za izradu ravnih ukrijepljenih panela.....	98
Tablica 5.3 I okretni valjčasti transporter.....	98
Tablica 5.4 II okretni valjčasti transporter.....	99
Tablica 5.5 Parametri II takta linije za izradu ravnih ukrijepljenih panela.....	99
Tablica 5.6 Međuskladišta.....	99
Tablica 5.7 Označavanje teoretskih linija.....	99
Tablica 5.8 Namještanje i zavarivanje ukrepa.....	99
Tablica 5.9 III okretni valjčasti transporter.....	100
Tablica 5.10 Specifikacija radnih stanica u procesu.....	108
Tablica 5.11 Vremena ciklusa za radne stanice proizvodnog procesa.....	112
Tablica 5.12 Ukupnog trajanja procesa korištenjem RFID tehnologije.....	129

POPIS PRIVITAKA

Privitak br. 1. Anketni upitnik za Poglavlje br.3, (<https://docs.google.com/forms/>)

Prvi dio - „Razina digitalizacije u tvrtkama – postojeće stanje“

Privitak br. 2. Anketni upitnik za Poglavlje br.3, (<https://docs.google.com/forms/>)

Drugi dio - „Implementacija digitalnih tehnologija za *Brodogradnju 4.0*“

Privitak br. 3. *AHP* metoda: Tablični prikazi dobivenih lokalnih i ukupnih prioriteta pomoću prilagođenog alata za hijerarhijsko modeliranje u *Microsoft Excel-u*

Privitak br. 4. Simulacijsko modeliranje – privitci s tablicama materijala

PRIVITAK BR. 1

Anketni upitnik za Poglavlje br.3

(<https://docs.google.com/forms/>)

Prvi dio - „Razina digitalizacije u tvrtkama – postojeće stanje“

Privitak br.1 – Anketni upitnik za Poglavlje br.3, (<https://docs.google.com/forms/>)

Shipbuilding 4.0 implementation methodology - 2022/2023



Form description

Email *

Valid email address

This form is collecting email addresses. [Change settings](#)

Select the country location of your company *

Short-answer text

Choose one of the answers that best describe the size of your company *

- ☐ The company has less than 10 employees
- ☐ The company has 10 - 19 employees
- ☐ The company has 20 - 49 employees
- ☐ The company has 50 - 99 employees
- ☐ The company has 100 - 249 employees
- ☐ The company has 250 - 499 employees
- ☐ The company has 500 - 999 employees
- ☐ The company has 1.000 - 4.999 employees
- ☐ The company has more than 5,000 employees

Select the answer that best describes your company's business success *

- ☐ The company's annual income is less than 1 million €
- ☐ The company's annual income is 1 - 2 million €
- ☐ The company's annual income is 2 - 7 million €
- ☐ The company's annual income is 7 - 10 million €
- ☐ The company's annual income is 10 - 20 million €
- ☐ The company's annual income is 20 - 50 million €
- ☐ The company's annual income is 50 - 100 million €
- ☐ The company's annual income is 100 - 250 million €
- ☐ The company's annual income is 250 - 500 million €
- ☐ The company's annual income is more than 500 million €

Select the answer that best describes your company business: *

- ☐ Management and control
- ☐ R&D
- ☐ Design
- ☐ Ship equipment supplier
- ☐ Logistics
- ☐ Quality Control
- ☐ Marketing
- ☐ Modelling and simulations
- ☐ IT solutions
- ☐ Recruitment
- ☐ Education

- ☐ Research Institutes
- ☐ Classification societies
- ☐ Shipbuilding production process

Select the answers that best describe the products in your company *

- ☐ Management and control
- ☐ Purchasing
- ☐ R&D
- ☐ Project design
- ☐ Ship equipment production
- ☐ Logistics
- ☐ Planning
- ☐ Quality Control
- ☐ Marketing
- ☐ IT solutions
- ☐ Recruitment
- ☐ Education
- ☐ Research Institutes
- ☐ Classification societies
- ☐ Ship operators

Select the answers that best describe the product/solution development in your company: *

- ☐ Production development by using CAD systems,
- ☐ Production development by using Virtual Reality (VR), 3D simulation and scanning
- ☐ Production development by using Digital Factory (DF),
- ☐ Production development by using Augmented Reality (AR),
- ☐ Production development by using Rapid Prototyping (RP),
- ☐ Production development by using customised PLM solutions,
- ☐ Production development by adopting your own customized solutions.

Select the answer that best describes the technology that dominates in your company: *

- ☐ Manual processing or manual assembly,
- ☐ Automated production line or machining machines,
- ☐ Modern machining centers with automated transport or robotic stations of automated production,
- ☐ Adaptive and intelligent technology for individual production
- ☐ Sensor production process, sensors installed on the machines to enable predictive analytics.

Choose the answer that best describes the management and control of your business and product processes: *

- ☐ Oral man-to-man communication (the manager instructs with the employee directly),
- ☐ Written man-to-man communication (the manager instructs the employees in written work order),
- ☐ Man-to-machine communication (the worker manages the machine or the production line),
- ☐ Machine-to-machine communication (M2M),
- ☐ Intranet Collaborative communication.

Select the answer that best describes the Quality Control management in your company: *

- ☐ Product/solution control at the end of the production process,
- ☐ Intermediate control during the production process,
- ☐ Control according to the Total Quality Management (TQM) concept,
- ☐ Quality Control according to ISO and Six Sigma,
- ☐ Smart Quality Control (Auto-Adjusted Smart Quality Control Process),
- ☐ What is Quality Control management?

Select the answer that best describes the Process planning in your company *

- ☐ Process planning relies on the experienced company experts,
- ☐ Process planning relies on the conventional planning software,
- ☐ Process planning relies on the Process Planning Software,
- ☐ Process planning relies on the Enterprise Resource Planning Software (ERP),
- ☐ Process planning relies on the Structure Dynamics Control (SDC).

Select the answer that best describes the Product Lifecycle Management (PLM) in your company: *

- ☐ The company is organised into functional departments,
- ☐ The company departments are organized connected via Computer Integrated Manufacturing (CIM),
- ☐ The company departments are organized connected via Enterprises Resource Planning (ERP), Manage...
- ☐ The company is integrated into the Product Lifecycle Management Cloud,

Select the answer that best describes the Product Lifecycle Management (PLM) software in your company: *

- ☐ PLM software is company IT product,
- ☐ PLM software was purchased from the national IT company,
- ☐ PLM software was purchased from the international IT company,

Select the answer that described the influence on product quality and importance of horizontal integration with the bridge-connected suppliers in your company: *

- ☐ Bridge-connected integration with the suppliers is crucial to the product quality and speed of the producti...
- ☐ Close connection to the suppliers is important, but not crucial for the result of the development of the pr...
- ☐ Connection to the suppliers has no influence on the result of the development of the product,
- ☐ No connection with the suppliers, product is possible to develop and produce by following similar produc...
- ☐ No connection with the suppliers, the product will be just purchased according to the authorised inquired...
- ☐ We are not very much in the contact with the suppliers,

Select what is the most important topic of the Shipbuilding 4.0 transformation technologies that need to be implemented to start with Shipbuilding 4.0 of the shipbuilding production process: *

- ☐ Internet of Things & Ubiquitous connectivity,
- ☐ Data Mining,
- ☐ Additive manufacturing,
- ☐ Collaborative robotics,
- ☐ Virtual Modelling and Augmented Reality,
- ☐ Design the Digital Twin,
- ☐ Digitalisation of the workshops,
- ☐ Cyber safety and security,
- ☐ Big Data and analytics,
- ☐ Robotic process automation,
- ☐ Integrated supply chain,
- ☐ Predictive maintenance,
- ☐ Resource efficiency,
- ☐ Regulatory framework,
- ☐ Cyber-Physical Systems,

...

Select level of influence of vertical integration between workshop to the top management in your company: *

- ☐ Strong and on-time vertical interconnection minimize errors and failure repetitiveness,
- ☐ Connectivity is important only for the material and information flow,
- ☐ Connectivity is not so important, all the employees know their tasks.
- ☐ I don not know

Select the answer that described the influence on hiring qualified staff to manage digital processes in the Shipbuilding 4.0: *

- ☐ Qualified experts need to have a high degree in both; technical knowledge and to be IT experts,
- ☐ The changes can be possible only with the technical experts supported by well known IT solutions,
- ☐ The changes are possible with the present staff organisation and education,
- ☐ Qualified educated staff with the skilled in IT solutions are good base of the changes toward digitalisation,
- ☐ Qualified staff is the center of the changes toward Shipbuilding 4.0
- ☐ Company is still not preparing for the staff changes

Select the answer where to starting with the Shipyard 4.0 implementation: *

- ☐ Sales,
- ☐ Purchasing,
- ☐ R&D,
- ☐ Design of the vessel,
- ☐ Design of the building technology,
- ☐ Panel and robotic lines,
- ☐ Preassembly hull blocks,
- ☐ Erection and assembly,
- ☐ Outfitting workshops,
- ☐ Management,
- ☐ Shipyard vendors,
- ☐ Ship operators,

...

Select your position in the company: *

- ☐ Management
- ☐ Sales
- ☐ Purchasing
- ☐ Finances
- ☐ R&D
- ☐ Design department
- ☐ Technology department
- ☐ Production
- ☐ Logistics
- ☐ Planning
- ☐ Quality Control
- ☐ Marketing
- ☐ IT solutions
- ☐ Modelling and simulations

Please specify your occupation *

Short-answer text
.....

How implementation of Shipbuilding 4.0 digital technologies would help to your company

- ☐ Productivity would be significantly increased
- ☐ Production and process errors would be reduced
- ☐ Process controllability would be increased
- ☐ Design and production planning would be significantly more accurate
- ☐ Monitoring of process activities would be more precise

...

Whether there is already an application of any Shipbuilding 4.0 activities already implemented ^{*} in your company

- ☐ Yes
- ☐ No

Whether there is any Shipbuilding 4.0 implementation methodology planning activities already prepared in your company

- ☐ Yes
- ☐ No

...

How would you rate employees' impact on Shipbuilding 4.0 implementation process ^{*}

	1	2	3	4	5	
low	☐	☐	☐	☐	☐	high

How would you rate importance of vertical and horizontal interconnectivity in company

	1	2	3	4	5	
low	☐	☐	☐	☐	☐	high

How would you rated level of connectivity softwares in the company

	1	2	3	4	5	
low	☐	☐	☐	☐	☐	high

How would you rated software connection level with the suppliers

	1	2	3	4	5	
low	☐	☐	☐	☐	☐	high

How would you rated software connection level with the Clients

	1	2	3	4	5	
low	☐	☐	☐	☐	☐	high

How would you rated currently available interconnectivity infrastructure in the company

	1	2	3	4	5	
low	☐	☐	☐	☐	☐	high

How would you rated currently available flexibility of production process as preparation for Shipbuilding 4.0

	1	2	3	4	5	
low	☐	☐	☐	☐	☐	high

PRIVITAK BR. 2

Anketni upitnik za Poglavlje br.3

(<https://docs.google.com/forms/>)

Drugi dio - „Implementacija digitalnih tehnologija za *Brodogradnju 4.0*“

Privitak br.2 – Anketni upitnik za Poglavlje br.3, (<https://docs.google.com/forms/>)
 „Implementacija digitalnih tehnologija za *Brodogradnju 4.0*“

Please rank the following digital technologies according importance when applying Shipbuilding 4.0

	Low importance	Moderate impo...	Medium impor...	High importance	Very high impo...
Internet of thin...	☐	☐	☐	☐	☐
Cyber-Physical ...	☐	☐	☐	☐	☐
Digital Twin	☐	☐	☐	☐	☐
Cyber Security	☐	☐	☐	☐	☐
Big Data	☐	☐	☐	☐	☐
Augmented Re...	☐	☐	☐	☐	☐
Adittive Manuf...	☐	☐	☐	☐	☐
Autonomous V...	☐	☐	☐	☐	☐
Visualisation & ...	☐	☐	☐	☐	☐
Robotic proces...	☐	☐	☐	☐	☐
Production Pro...	☐	☐	☐	☐	☐
Smart advance...	☐	☐	☐	☐	☐
Warehouse act...	☐	☐	☐	☐	☐
Progresive sen...	☐	☐	☐	☐	☐
Cloud Computi...	☐	☐	☐	☐	☐
Automatization...	☐	☐	☐	☐	☐

Predictive analy...	☐	☐	☐	☐	☐
Decision makin...	☐	☐	☐	☐	☐
Selfoptimizatio...	☐	☐	☐	☐	☐
Integrated Sup...	☐	☐	☐	☐	☐

...

Please rank the topics towards Shipbuilding 4.0 implementation priorities (from most important to least important)

low importance moderate impo... medium impor... high importance very high impo...

Overall Interco...	☐	☐	☐	☐	☐
IT Infrastructure	☐	☐	☐	☐	☐
Modularity	☐	☐	☐	☐	☐
Data Security	☐	☐	☐	☐	☐
System Flexibil...	☐	☐	☐	☐	☐
Overall empoly...	☐	☐	☐	☐	☐

...

How would you rate influence of company currently availability resources for Shipbuilding 4.0 implementation

	1	2	3	4	5	
least important	☐	☐	☐	☐	☐	most important

Please rate your evaluation of investment cost for implementation of below Shipbuilding 4.0 technologies in middle size shipyard

	below 1 mil Euro	between 1 - 5 ...	between 5 - 10 ...	between 10 - 1...	above 15 mil E...
Automation of ...	☐	☐	☐	☐	☐
Overall sensori...	☐	☐	☐	☐	☐
Big Data analyt...	☐	☐	☐	☐	☐
Overall interco...	☐	☐	☐	☐	☐
Cyber security	☐	☐	☐	☐	☐
Vertical and ho...	☐	☐	☐	☐	☐
Internet of Thin...	☐	☐	☐	☐	☐
Cyber-Physical ...	☐	☐	☐	☐	☐
Unmanned inte...	☐	☐	☐	☐	☐
Lifecycle produ...	☐	☐	☐	☐	☐
Real time conn...	☐	☐	☐	☐	☐
Design and pro...	☐	☐	☐	☐	☐
Predictive mai...	☐	☐	☐	☐	☐
Real time plan...	☐	☐	☐	☐	☐

Please rank the criteria that should be compared when implementing the Shipbuilding 4.0 concept

	low importance	moderate impo...	medium impor...	high importance	very high impo...
C1-Investment ...	☐	☐	☐	☐	☐
C2- Increasing ...	☐	☐	☐	☐	☐
C3-Complexicit...	☐	☐	☐	☐	☐
C4-Quality incr...	☐	☐	☐	☐	☐
C5-Organizatio...	☐	☐	☐	☐	☐
C6-Infrastructu...	☐	☐	☐	☐	☐
C7-Radiness fo...	☐	☐	☐	☐	☐
C8-Investment ...	☐	☐	☐	☐	☐
C9-Reduction o...	☐	☐	☐	☐	☐
C10-Implement...	☐	☐	☐	☐	☐

Rank the Shipbuilding 4.0 technologies that should start with implementation in middle size shipyard

	low importance	moderate impo...	medium impor...	high importance	very high impo...
Internet of Thin...	☐	☐	☐	☐	☐
Sensors and R...	☐	☐	☐	☐	☐
Modularity in o...	☐	☐	☐	☐	☐
Predictive mai...	☐	☐	☐	☐	☐
Flexibility for fa...	☐	☐	☐	☐	☐
Employees reo...	☐	☐	☐	☐	☐
Ream time pro...	☐	☐	☐	☐	☐
IT infrastructure	☐	☐	☐	☐	☐
Simulation and...	☐	☐	☐	☐	☐
Hull and outfitti...	☐	☐	☐	☐	☐
Automatisation...	☐	☐	☐	☐	☐
Warehouse rob...	☐	☐	☐	☐	☐

PRIVITAK BR. 3.

AHP metoda: Tablični prikazi dobivenih lokalnih i ukupnih prioriteta pomoću prilagođenog alata za hijerarhijsko modeliranje u *Microsoft Excel-u*

Privitak br.3 – Obrada podataka usporedbe kriterija i odabranih elemenata koncepta

Matrice usporedbe elemenata koncepta međusobno prema svakom od kriterija

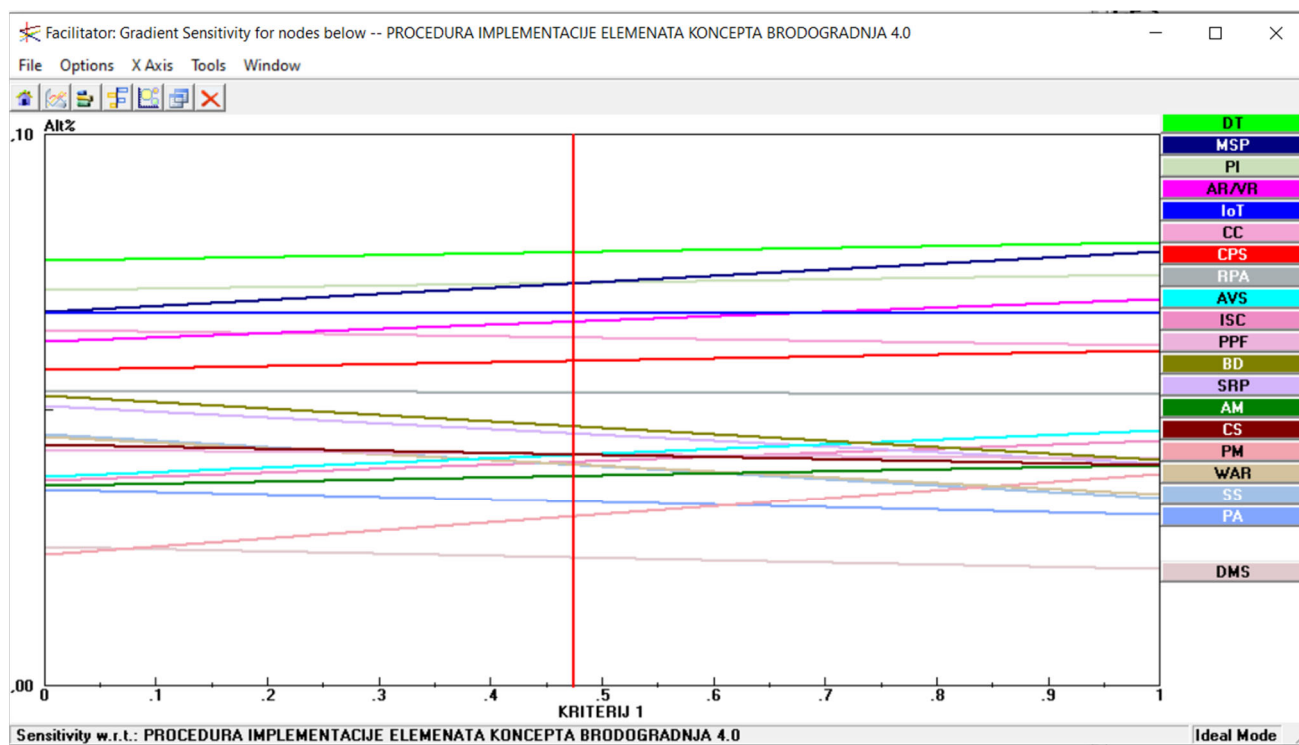
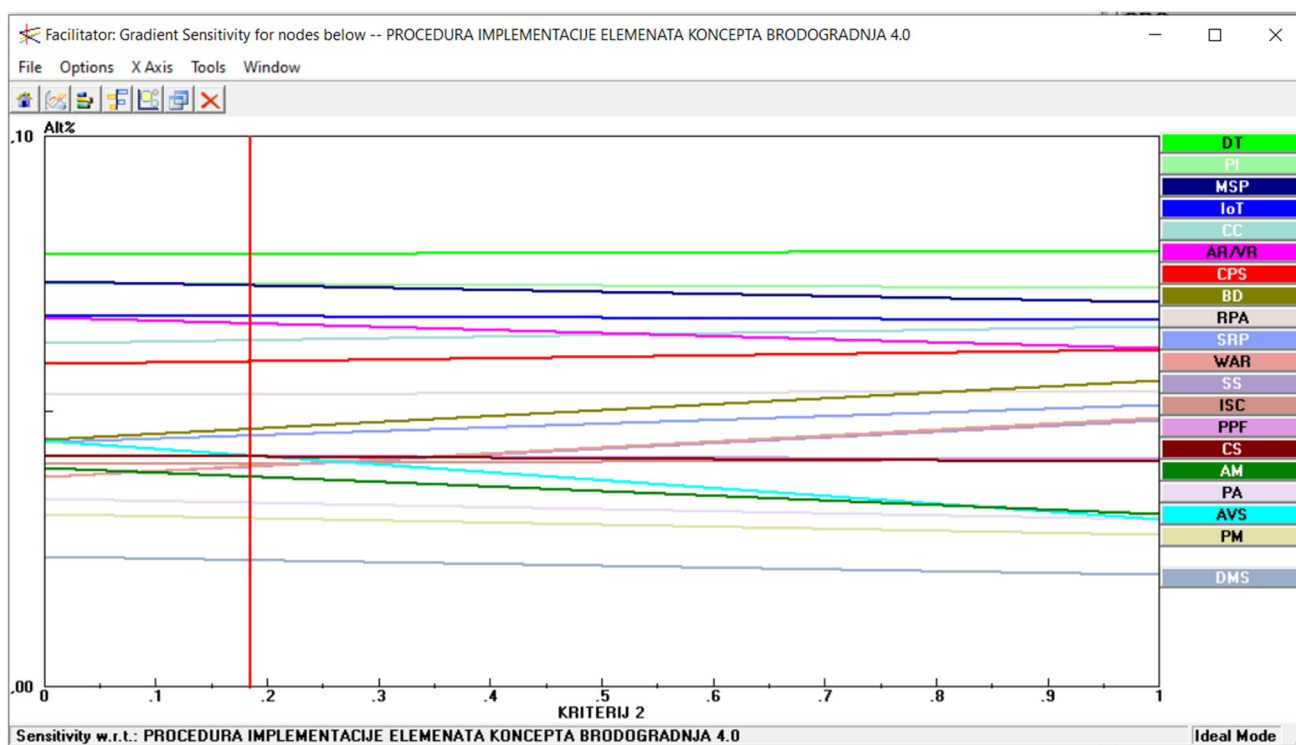
$$A_I = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \frac{1}{5} & 3 & 5 & 7 & 7 & 5 & 1 & 3 & 7 & 5 & 7 & 1 & 5 & 7 & 5 & 7 & 7 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 5 & 5 & 7 & 7 & 7 & 7 & 5 & 5 & \frac{1}{5} & 3 & 1 & 5 & 7 & 7 & 7 & 7 & 9 \\ 5 & 1 & 1 & 7 & 7 & 7 & 7 & 7 & 5 & 3 & 7 & 7 & 3 & 1 & 3 & 7 & 5 & 7 & 7 & 9 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 5 & \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{3} & 1 & 5 & \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 & 5 & 3 & 5 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 3 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{5} & 5 & 1 & 3 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 5 & \frac{1}{3} & 7 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & 5 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 1 & 1 & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 3 & 5 & 7 & 5 & 3 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & 3 & 3 & 1 & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & 1 & 3 & 5 & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 3 & 1 & 5 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & 3 & 3 & 5 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 1 & 1 & 3 & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 3 & 5 & 1 & 5 \\ 1 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 3 & 3 & 3 & 7 & 1 & 1 & 1 & 5 & 7 & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 5 & 5 & 7 & \frac{1}{7} & 5 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 3 & 1 & 1 & 7 & 3 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 5 & \frac{1}{7} & 5 & \frac{1}{5} & 7 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 5 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 1 & 5 & 1 & 3 & 1 & 1 & 3 & 1 & \frac{1}{7} & 7 & \frac{1}{7} & 5 & 3 & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 5 \\ \frac{1}{7} & 5 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & 7 & 1 & \frac{1}{5} & 5 & 7 & 1 & \frac{1}{3} & 7 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 3 & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 3 & 1 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 3 & 1 & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{3} & 7 & 7 & 7 & 7 & \frac{1}{7} & 5 & 1 & 7 & 5 & 3 & 5 & 7 & 7 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 5 & 1 & 3 & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 5 & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 3 & 1 & 1 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & 3 & 3 & \frac{1}{3} & 7 & 5 & \frac{1}{5} & 5 & \frac{1}{3} & 3 & 7 & \frac{1}{5} & 5 & 1 & \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{5} & 1 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & 1 & 5 & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{3} & 5 & 7 & 1 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 3 & 5 & \frac{1}{5} & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{5} & 1 & 1 & 7 & 5 & 3 & 5 & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & 1 & 5 & 1 & \frac{1}{3} & 1 & 1 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 3 & 1 & \frac{1}{7} & 1 & 1 & 3 & \frac{1}{5} & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

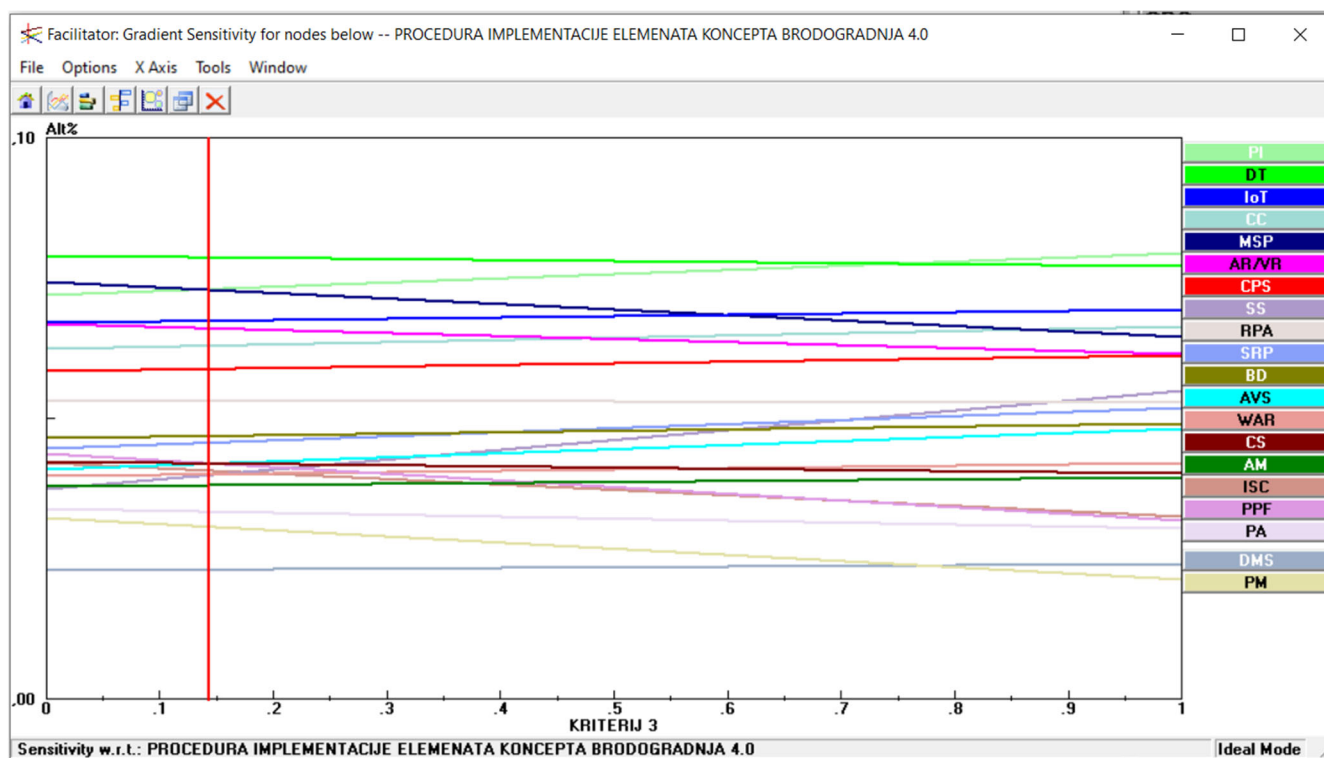
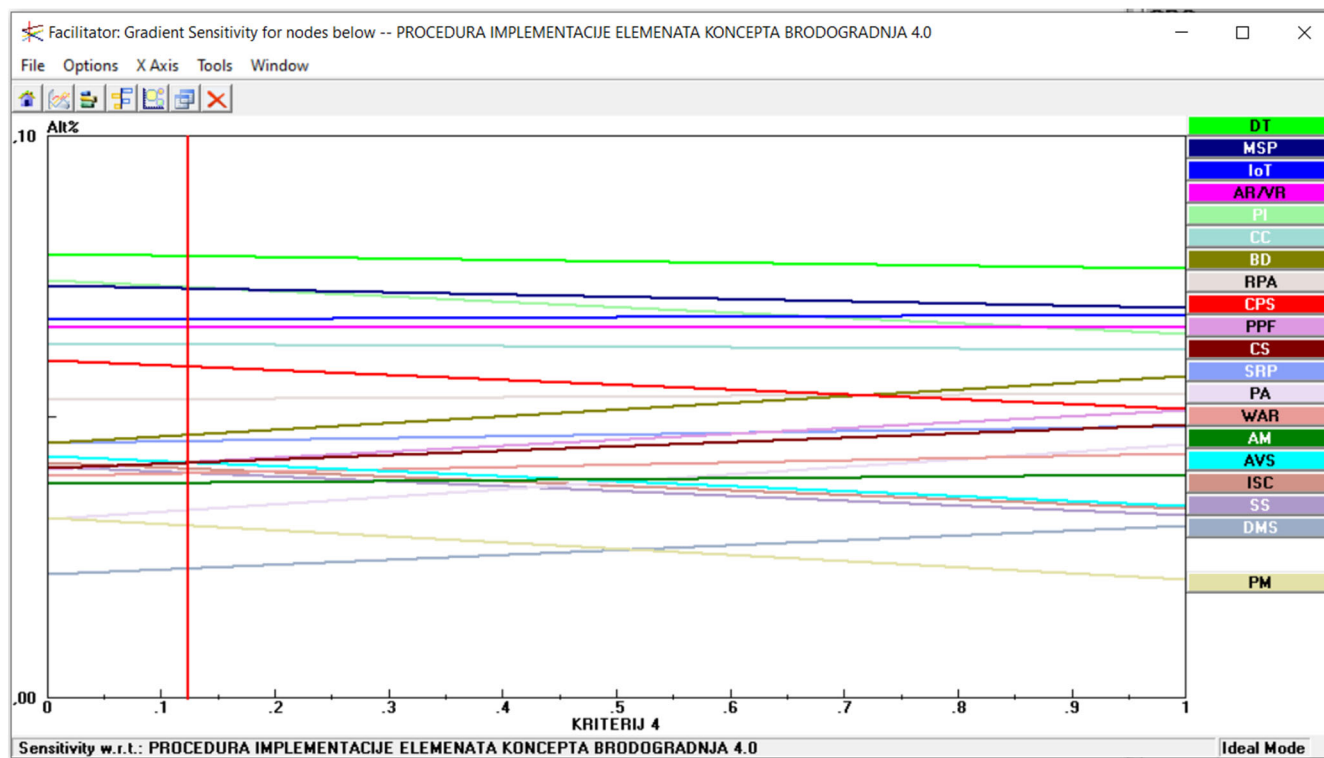
$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 7 & 1 & 7 & 5 & 3 & 5 & 7 & 7 & 3 & 5 & 7 & \frac{1}{3} & 3 & 5 & 5 & 7 & 7 & 7 \\ 1 & 1 & \frac{1}{5} & 5 & 1 & 5 & 7 & 3 & \frac{1}{5} & 1 & 5 & \frac{1}{3} & 7 & 7 & 5 & 7 & 5 & 7 & 3 & 5 \\ \frac{1}{7} & 5 & 1 & 3 & 7 & 5 & 7 & 7 & 5 & 7 & 5 & 5 & 7 & 1 & 3 & 7 & 5 & 3 & 3 & 7 \\ 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 1 & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 5 & \frac{1}{3} & 1 & 3 & \frac{1}{5} & 1 & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & 5 \\ \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{7} & 1 & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 3 & 5 & \frac{1}{7} & 3 & 5 & \frac{1}{7} & 1 & 5 & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 5 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 7 & 5 & 1 & 5 & 5 & 3 & \frac{1}{5} & 7 & \frac{1}{5} & 7 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 5 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 7 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & 3 & 3 & \frac{1}{5} & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 & 3 & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{5} & 1 & 3 & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & 1 & 5 & \frac{1}{5} & 1 & 1 & 7 & 5 & \frac{1}{7} & 3 & 5 & \frac{1}{5} & 5 & \frac{1}{3} & 3 & 1 & 5 & 3 \\ \frac{1}{7} & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 1 & 7 & 5 & 5 & \frac{1}{3} & 5 & 5 & 3 & \frac{1}{3} & 5 & 5 & \frac{1}{3} & 7 \\ \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 5 & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 1 & 5 & 3 & 5 & \frac{1}{7} & 5 & 3 & 5 & \frac{1}{3} & 5 & 7 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 3 & 7 & \frac{1}{7} & 1 & 7 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & 5 & 3 & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 5 & \frac{1}{7} & 5 & 7 \\ \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{3} & 5 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{5} & 3 & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 5 & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 1 & \frac{1}{7} & 7 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 5 & \frac{1}{7} & 3 \\ 3 & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 5 & 7 & 7 & \frac{1}{3} & 5 & \frac{1}{5} & 7 & \frac{1}{5} & 1 & 7 & 1 & 7 & 5 & 5 & 7 & 3 & 7 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 1 & 1 & 5 & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 5 & 5 & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & 1 & 1 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 5 & \frac{1}{5} & 1 & 1 & 3 & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 5 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{5} & 2 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 3 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 5 & 5 & 3 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{5} & 3 & 7 & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 7 & \frac{1}{3} & 5 & 1 & 7 & 1 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 7 & 5 & 7 & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 3 & 7 & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 5 & \frac{1}{7} & 1 & 1 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 5 & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & 1 & 3 & \frac{1}{3} & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

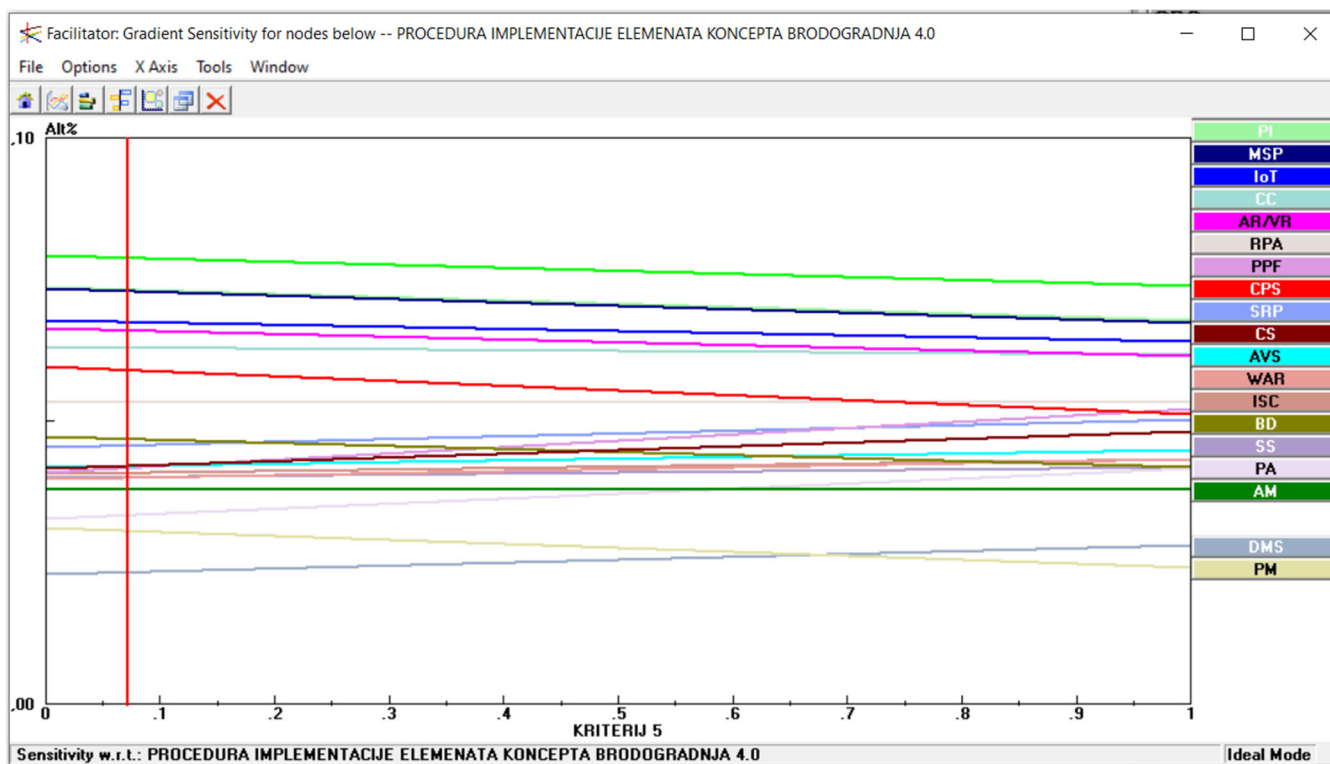
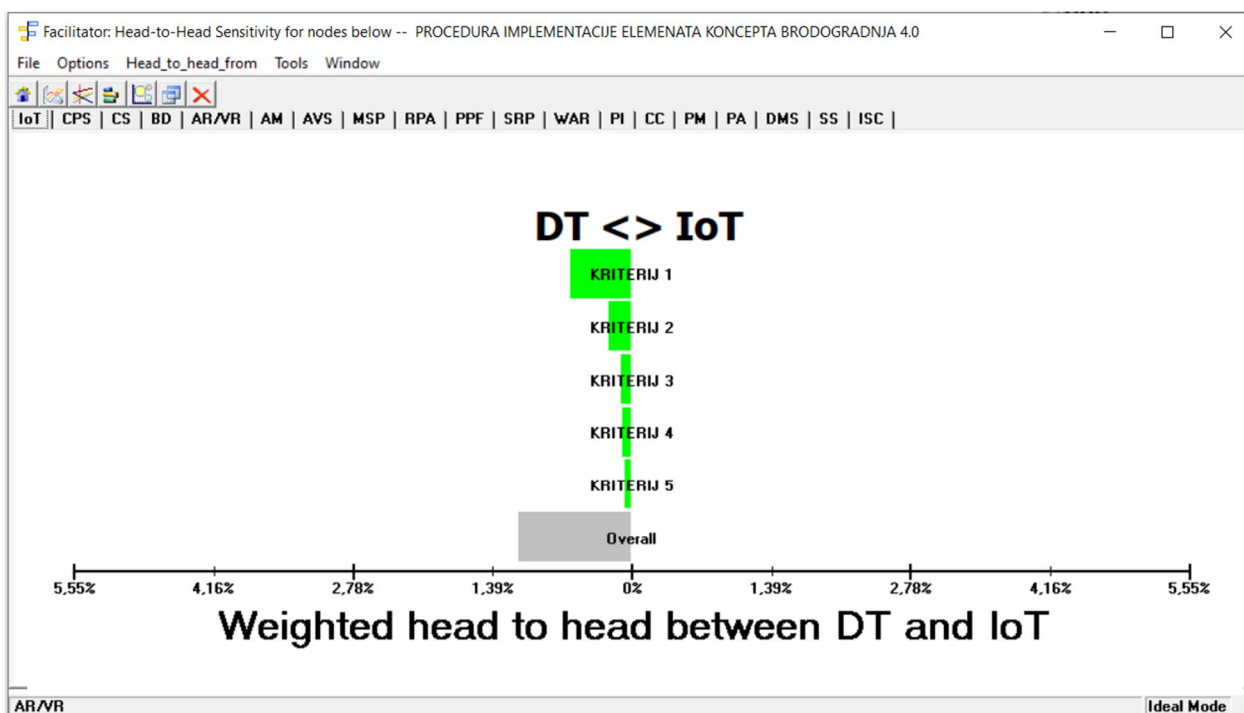
$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 5 & 5 & 1 & 3 & 7 & 1 & 5 & 7 & 7 & 7 & 7 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 7 & 5 & 3 & 5 \\ 1 & 1 & \frac{1}{3} & 5 & 5 & 3 & \frac{1}{3} & 7 & 5 & 3 & 5 & 5 & 7 & 1 & 5 & 7 & 5 & 7 & 3 & 3 \\ 1 & 3 & 1 & 5 & 7 & 5 & 7 & 3 & 7 & 7 & 5 & 5 & 7 & 7 & 7 & 7 & 7 & 5 & 3 & 5 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & 1 & \frac{1}{3} & 5 & 5 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & 5 & 5 & 5 & \frac{1}{3} & 3 & 7 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 1 & 1 & \frac{1}{7} & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 3 & 1 & \frac{1}{7} & 3 & 5 & 5 & 5 & 3 & \frac{1}{3} \\ 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 3 & 7 & 1 & 7 & 5 & \frac{1}{5} & 5 & 3 & \frac{1}{5} & 7 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 1 & \frac{1}{5} & 5 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 1 & 1 & \frac{1}{3} & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 5 & \frac{1}{5} & 5 & 1 & \frac{1}{3} & 3 & 1 & 5 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 \\ 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 3 & 3 & 5 & 3 & 3 & 1 & 7 & 5 & 5 & 3 & 5 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 3 & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & 5 & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & 1 & 1 & 7 & 5 & \frac{1}{7} & 5 & \frac{1}{3} & 5 & 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 5 & 5 & \frac{1}{3} & 5 & 1 & \frac{1}{5} & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & 3 & 5 & 1 & 3 & \frac{1}{5} \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 5 & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 3 & 1 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 3 & 1 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & 7 & 1 & \frac{1}{7} & 5 & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 3 & 7 & 1 & \frac{1}{7} & 3 & \frac{1}{5} & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{7} & 7 & 7 & 5 & 7 & 5 & \frac{1}{5} & 7 & 7 & 5 & 7 & 1 & 5 & 7 & 5 & 7 & 5 & 5 \\ 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 3 & 3 & \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{5} & 5 & 5 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 & 5 & 3 & 5 & \frac{1}{3} & 3 \\ 5 & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & 1 & 5 & 5 & 3 & \frac{1}{3} & 3 & 5 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & 1 & 3 & 5 & 3 & 3 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & 1 & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 3 & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 1 & 3 & 1 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{5} & 5 & 3 & 3 & \frac{1}{3} & 1 & 1 & 3 & 1 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & 1 & 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 5 & 5 & 5 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 1 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 3 & 3 & 5 & 1 & 5 & 1 & 5 & 1 & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

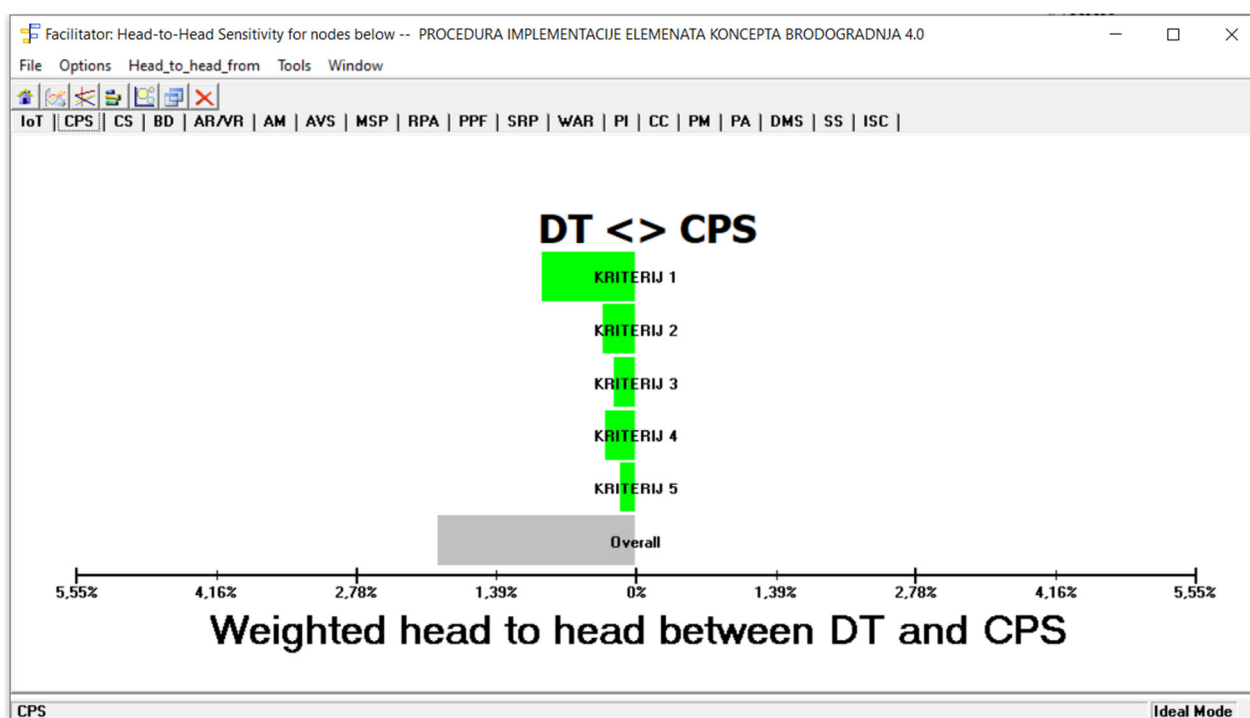
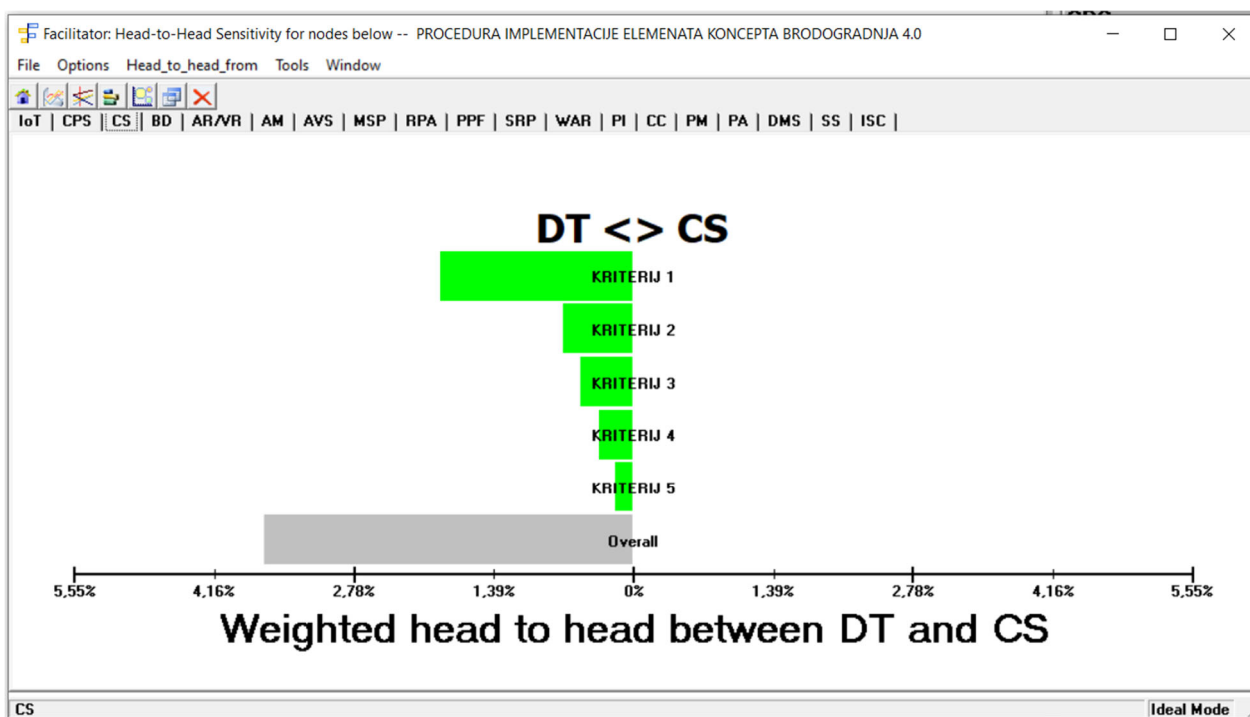
$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \frac{1}{7} & 3 & 3 & 5 & 7 & 7 & \frac{1}{7} & 5 & 5 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 3 & 3 & 3 & 5 & 5 & 5 & 7 \\ 1 & 1 & 3 & 5 & \frac{1}{5} & 3 & 5 & 1 & 1 & 5 & \frac{1}{5} & 7 & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & 1 & 5 & 3 & 5 \\ 7 & \frac{1}{3} & 1 & 7 & 5 & 5 & 7 & 5 & 5 & 3 & \frac{1}{3} & 5 & 7 & 5 & 3 & 5 & 3 & 5 & 3 & 7 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 5 & 1 & 5 & 7 & 5 & 5 & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{4} & 4 & 5 & 3 & \frac{1}{5} & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} \\ \frac{1}{3} & 5 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & 1 & 5 & 7 & 1 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & 5 & 3 & \frac{1}{3} & 1 & 5 & 3 & 3 & 3 & \frac{1}{3} & 1 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & 1 & 5 & \frac{1}{5} & 5 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 7 & 5 & 7 & 1 & \frac{1}{3} & 1 & 1 & 1 & 3 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{3} & 5 & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 5 & 3 & 1 & 5 & 3 & 3 & \frac{1}{3} & 1 \\ \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & 5 & 3 & 1 & 7 & 3 & \frac{1}{5} & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 7 & 3 & 5 & 1 & 5 & 3 \\ 7 & 1 & \frac{1}{5} & 5 & 7 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 1 & 7 & 5 & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 3 & 3 & 1 & 1 & 5 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 5 & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & 1 & 3 & 4 & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 3 & 1 & 5 & \frac{1}{7} & 5 \\ \frac{1}{5} & 5 & 3 & 4 & 5 & 3 & 3 & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 7 & 5 & \frac{1}{7} & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 1 & 3 \\ 3 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & \frac{1}{7} & 1 & 5 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & 5 & 3 & 1 & 3 & 5 \\ 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 5 & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 3 & \frac{1}{7} \\ \frac{1}{3} & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 7 & 7 & 5 & 7 & 7 & 5 & 1 & 7 & 5 & 1 & 5 & \frac{1}{3} & 5 \\ \frac{1}{3} & 5 & \frac{1}{3} & 5 & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 7 & \frac{1}{5} & 5 & 5 & \frac{1}{7} & 1 & 5 & 7 & 5 & 1 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 5 & \frac{1}{5} & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 3 \\ \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 & 1 & 3 & \frac{1}{3} & 3 & 1 & \frac{1}{7} & 1 & 1 & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 1 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{5} & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 3 & 7 & 1 & 1 & 3 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 7 & 3 & 1 & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 7 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 3 & 1 & 3 & 3 & 1 & 1 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 5 & 1 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 7 & \frac{1}{5} & 5 & 3 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

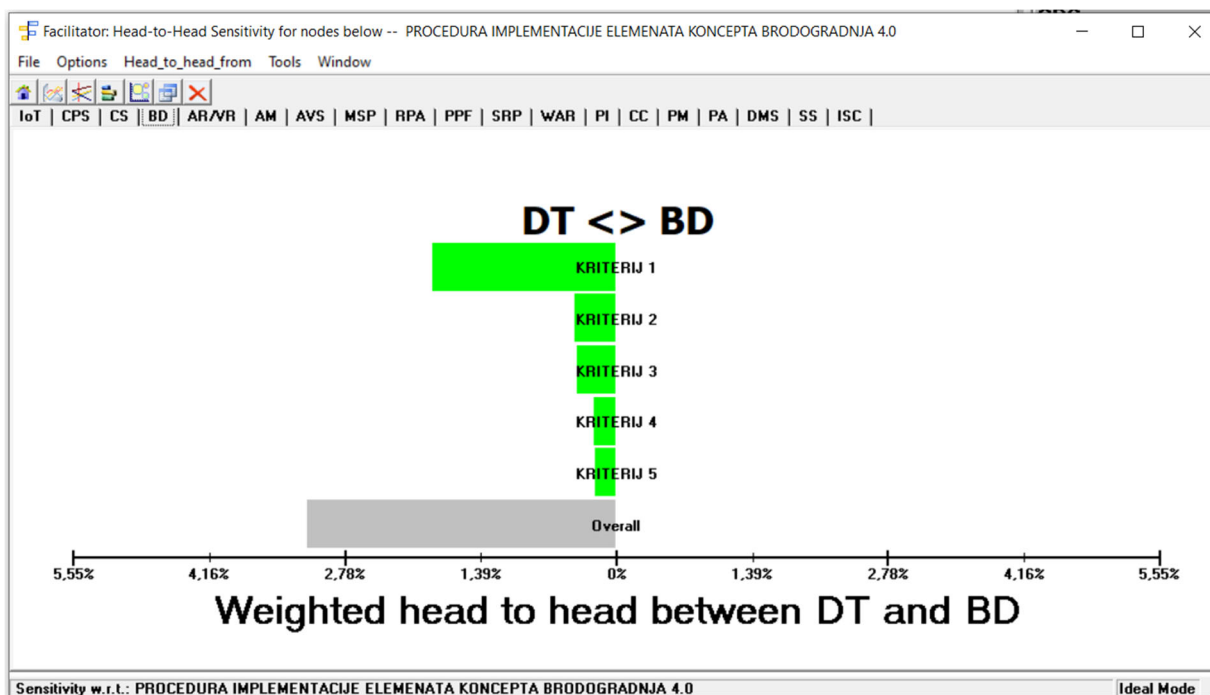
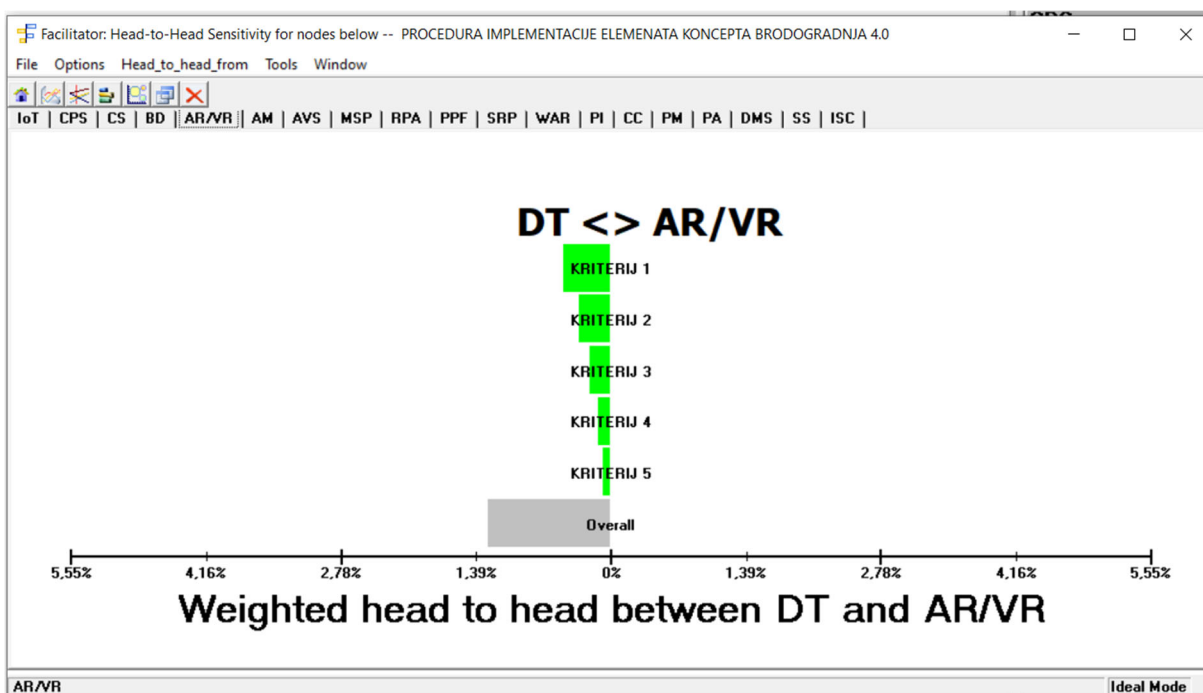
$$A_5 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 7 & \frac{1}{7} & 5 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 7 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 3 & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & 7 & 3 & 5 \\ 1 & 1 & 1 & 3 & 4 & 5 & 7 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 3 & 1 & \frac{1}{3} & 5 & 5 & 3 & 3 & 5 & \frac{1}{3} & 5 & 7 \\ 1 & 1 & 1 & 7 & 5 & 7 & 7 & 5 & 3 & 7 & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 5 & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & 3 \\ 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & 1 & 5 & \frac{1}{4} & 7 & 5 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 5 & 5 & 1 & 1 & 5 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 \\ 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{3} & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 4 & 5 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 5 \\ 7 & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 4 & 5 & 1 & \frac{1}{2} & 2 & 7 & 5 & 3 & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & 5 & \frac{1}{3} & 7 & 7 & \frac{1}{5} & 5 & 1 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 2 & 1 & \frac{1}{2} & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 3 & 3 & \frac{1}{5} & 1 & 3 & 2 \\ 2 & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{2} & 2 & 1 & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 1 & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 2 & 2 & 3 \\ 3 & 5 & \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & 1 & 7 & 1 & \frac{1}{4} & 5 & 5 & 7 & 7 & 5 & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 3 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & 5 & 3 & \frac{1}{5} & 1 & 7 & 4 & 1 & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 3 & \frac{1}{7} & 5 & 3 & 4 & \frac{1}{4} \\ 7 & 1 & \frac{1}{3} & 7 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 3 & \frac{1}{5} & 1 & 1 & \frac{1}{3} & 4 & 2 & 3 & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 2 \\ 5 & 3 & 3 & \frac{1}{5} & 5 & 7 & 3 & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 5 & 1 & \frac{1}{2} & 3 \\ 7 & \frac{1}{5} & 5 & \frac{1}{5} & 3 & 5 & 3 & 1 & \frac{1}{7} & 5 & 3 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 3 & 5 & 3 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 3 & 1 & 3 & \frac{1}{5} & 2 & 1 & \frac{1}{7} & 7 & \frac{1}{4} & 5 & 5 & 1 & 5 & \frac{1}{3} & 4 & \frac{1}{2} & 3 & 1 \\ 4 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{4} & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 3 & 5 & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & 7 & 4 & 3 \\ 4 & \frac{1}{5} & 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{3} & 7 & \frac{1}{3} & 3 & 5 & 3 & 3 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 2 & 1 \\ 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 1 & \frac{1}{7} & 5 & 3 & 5 & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & 4 & 2 & 1 & 5 & 7 & 5 \\ \frac{1}{7} & 3 & 5 & 3 & 3 & 5 & 1 & 2 & 5 & \frac{1}{3} & 1 & 1 & \frac{1}{5} & 2 & \frac{1}{7} & 3 & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{2} & 1 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 4 & 3 & 3 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 3 & \frac{1}{4} & 2 & 2 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{7} & 2 & 1 & \frac{1}{5} \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 4 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 3 & 1 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{5} & 1 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

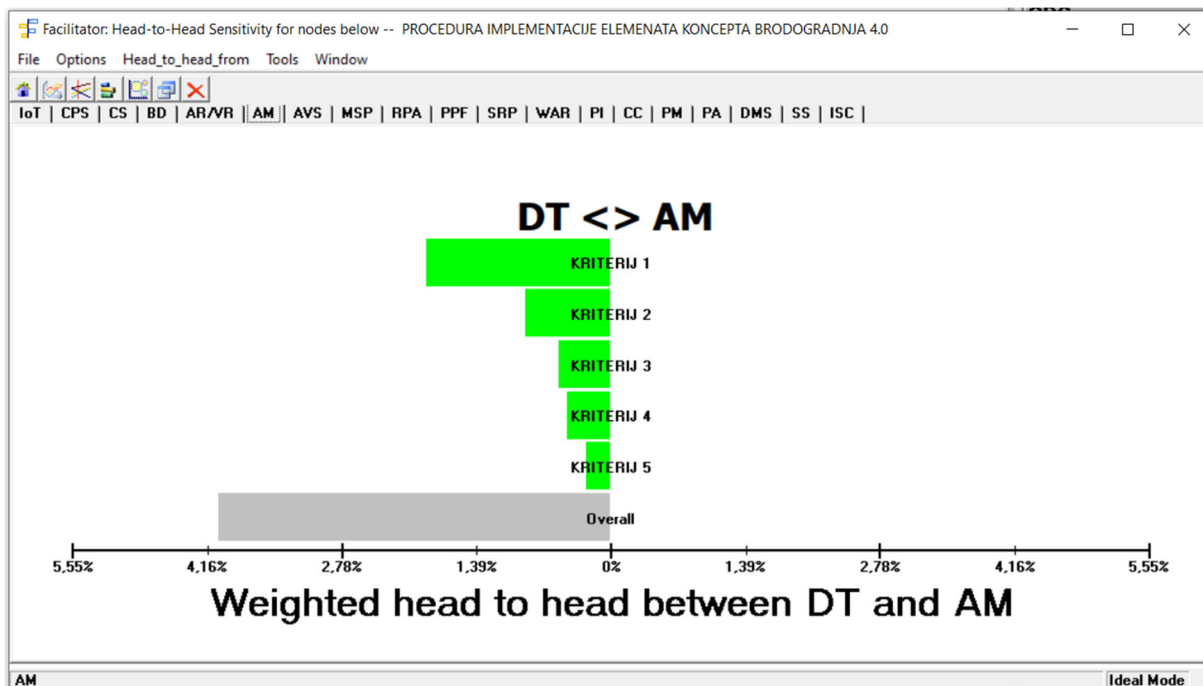
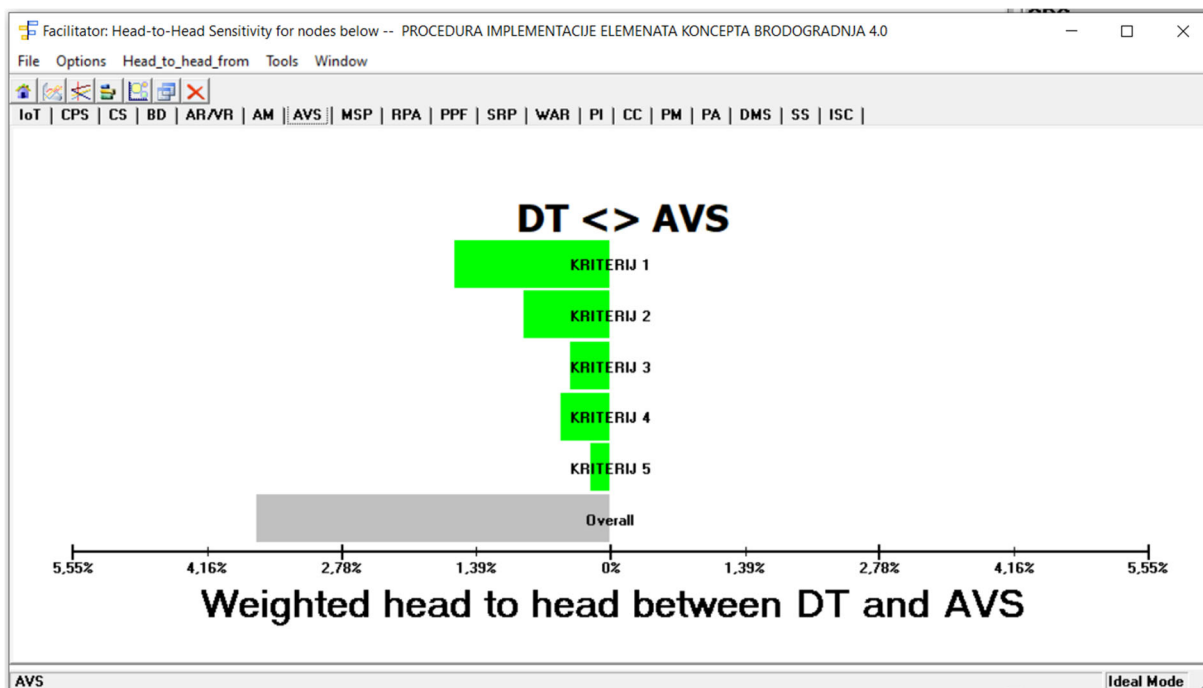
Slika P3.1 Analiza dijagramom stupnja osjetljivosti (*Gradient*) prema kriteriju 1Slika P3.2 Analiza dijagramom stupnja osjetljivosti (*Gradient*) prema kriteriju 2

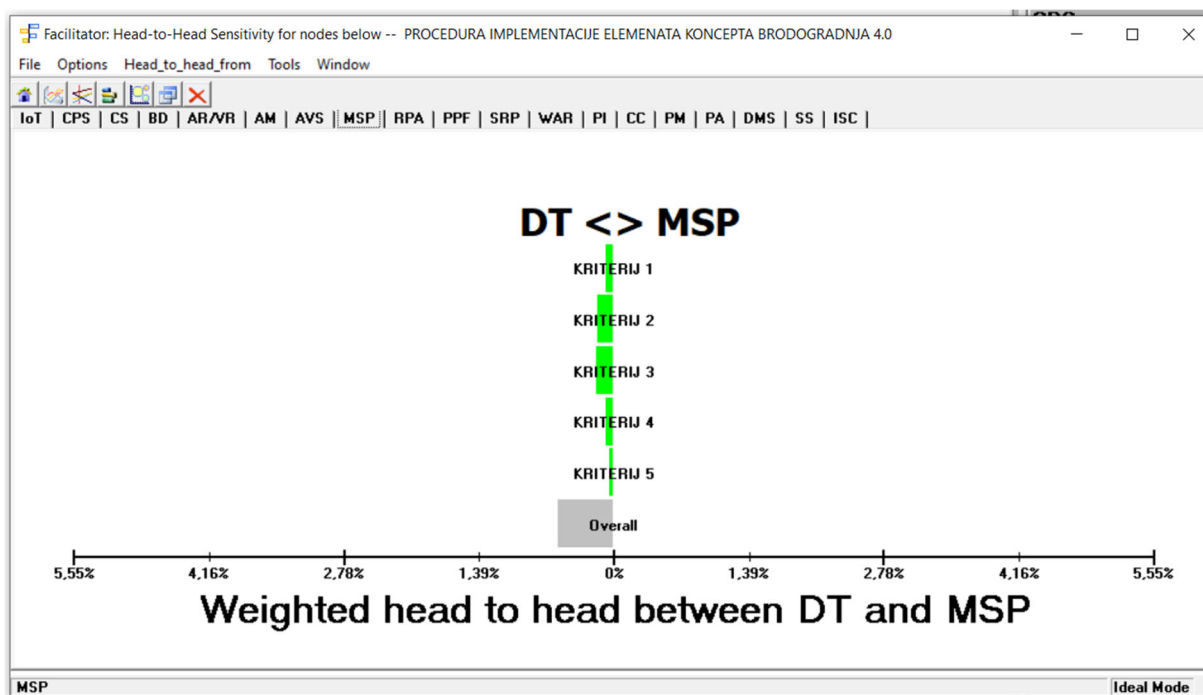
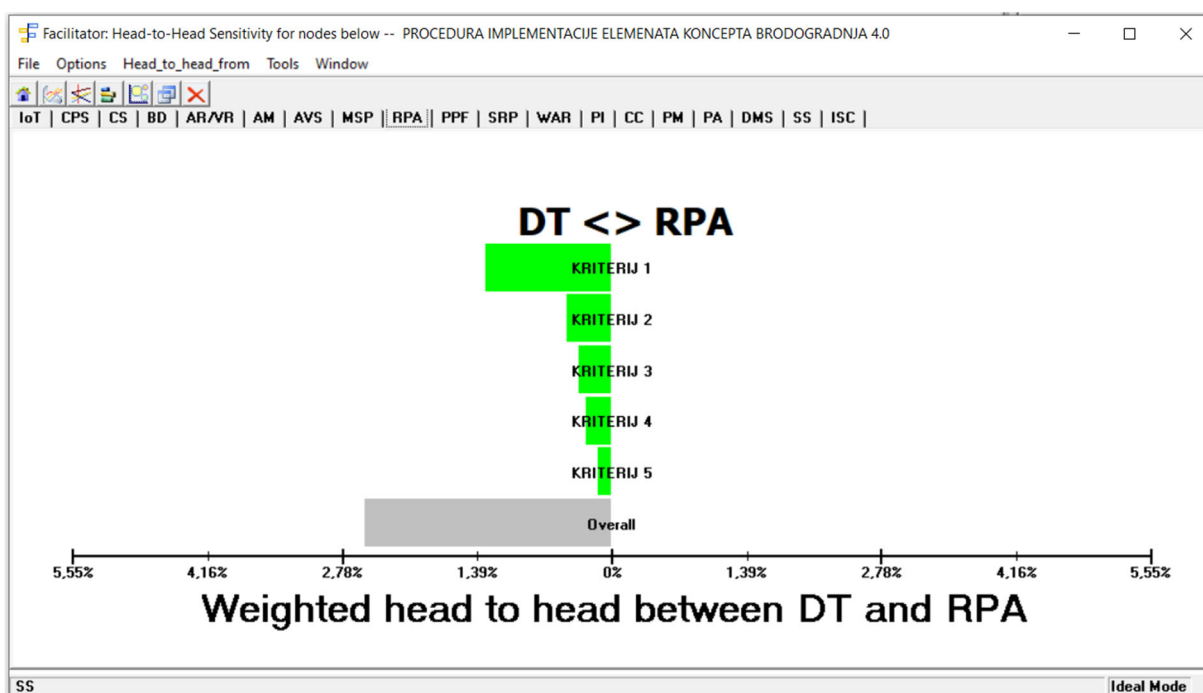
Slika P3.3 Analiza dijagramom stupnja osjetljivosti (*Gradient*) prema kriteriju 3Slika P3.4 Analiza dijagramom stupnja osjetljivosti (*Gradient*) prema kriteriju 4

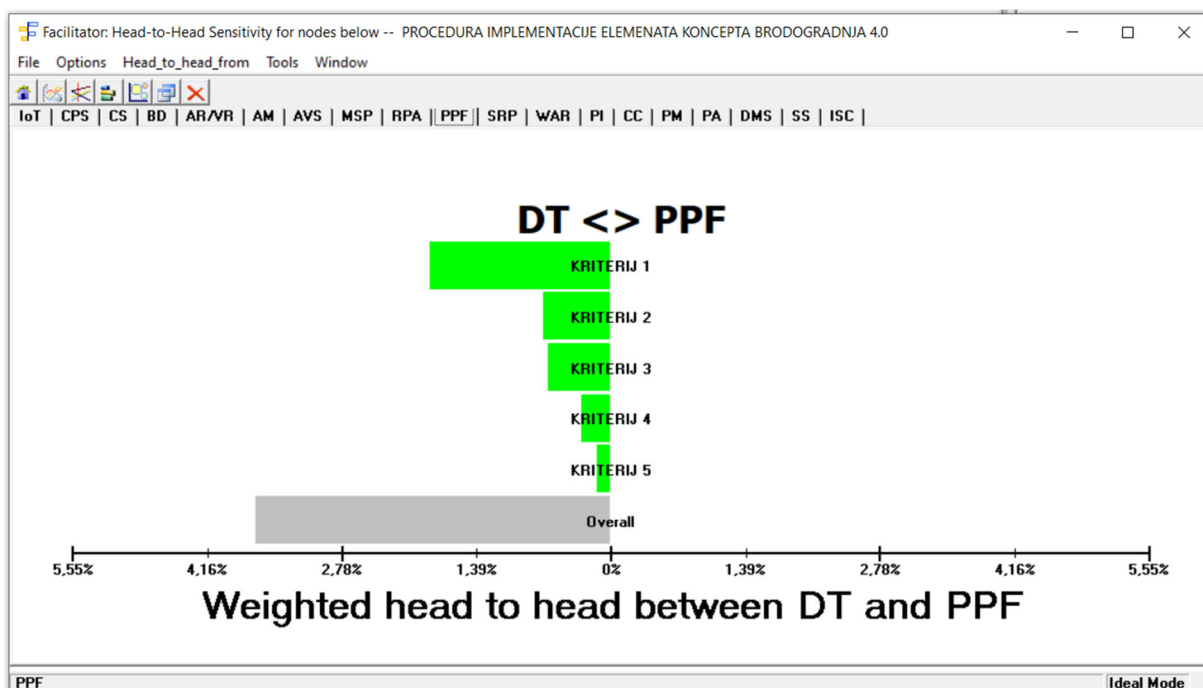
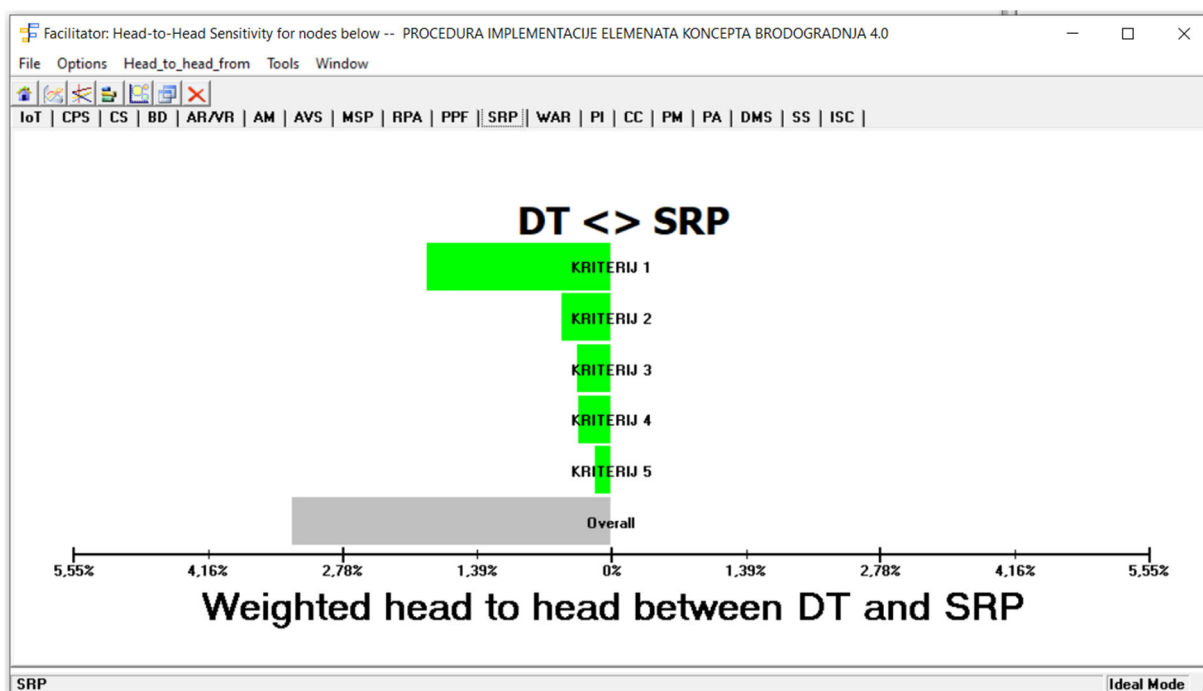
Slika P3.5 Analiza dijagramom stupnja osjetljivosti (*Gradient*) prema kriteriju 5Slika P3.6 Analiza dijagramom sučeljavanja elementa *DT* i elementa *IoT*

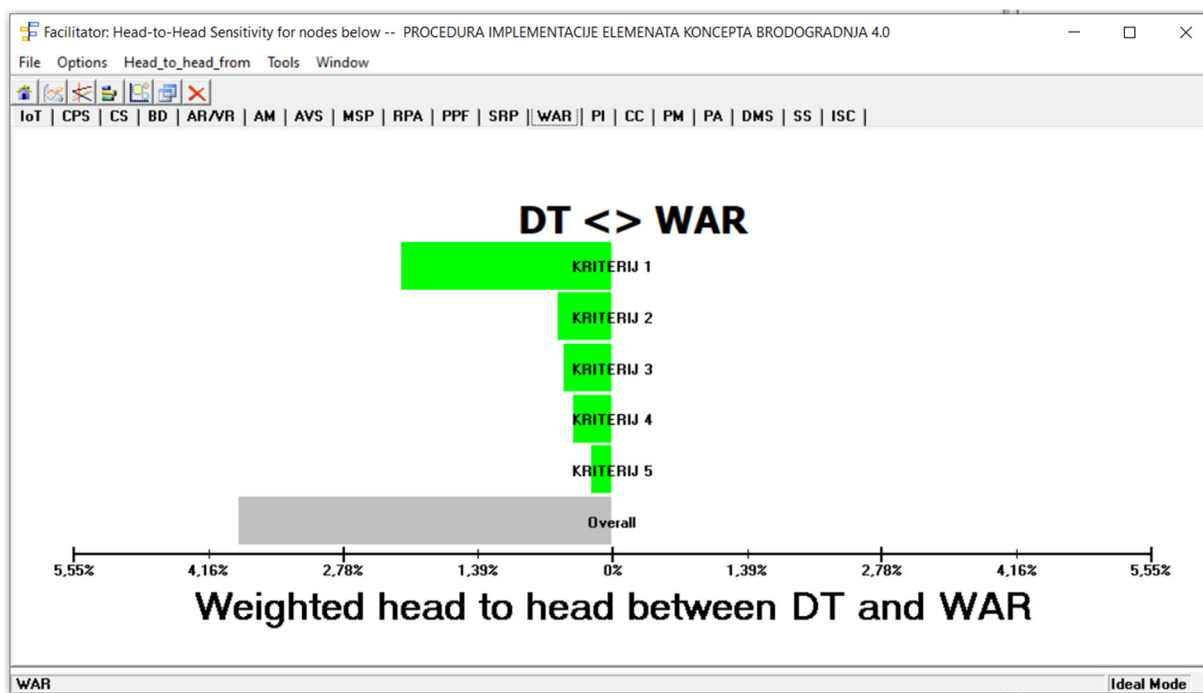
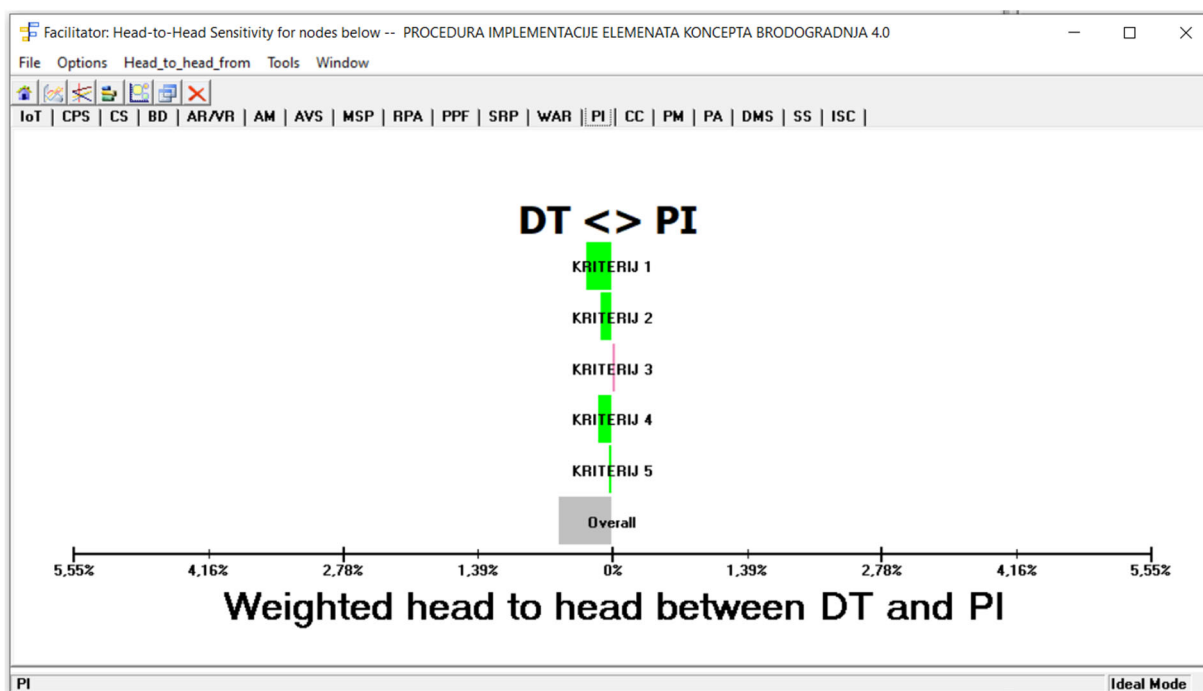
Slika P3.7 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa CPS*Slika P3.8 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa CS*

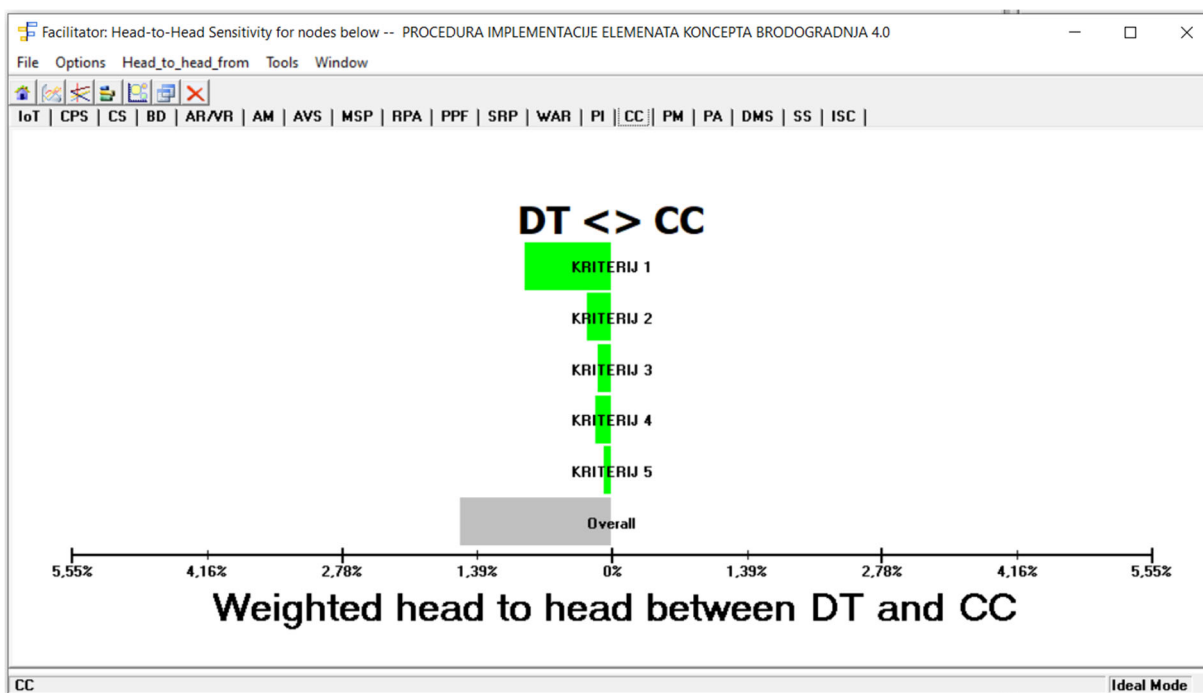
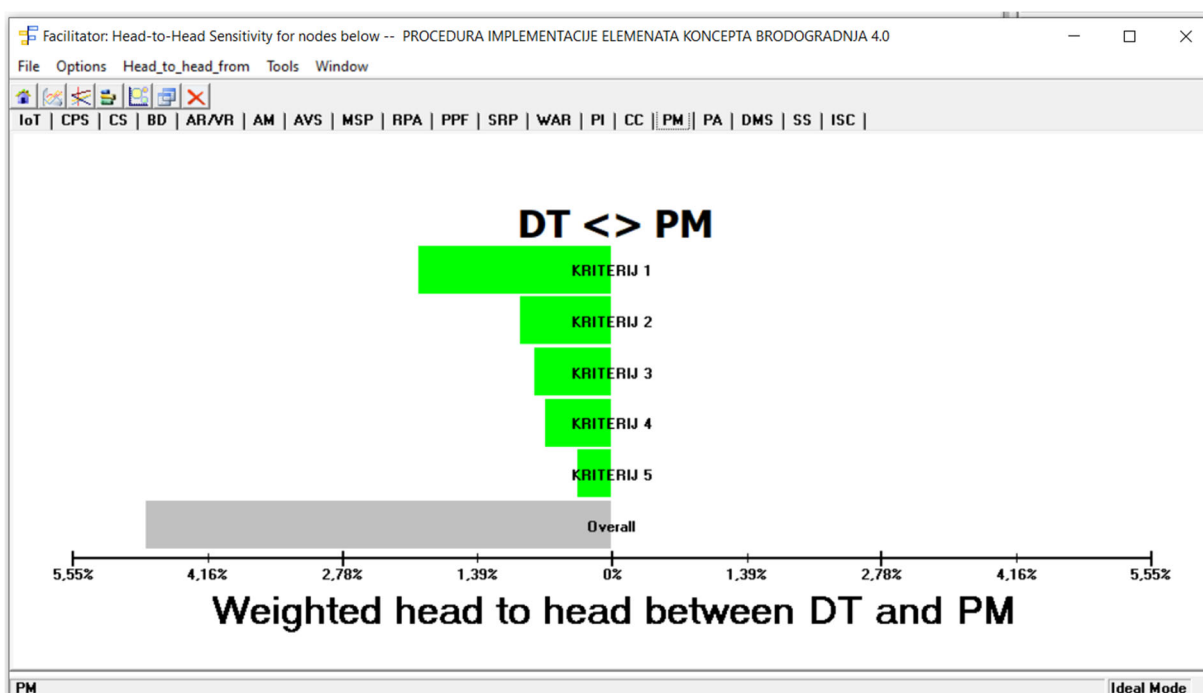
Slika P3.9 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa BD*Slika P3.10 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa AR/VR*

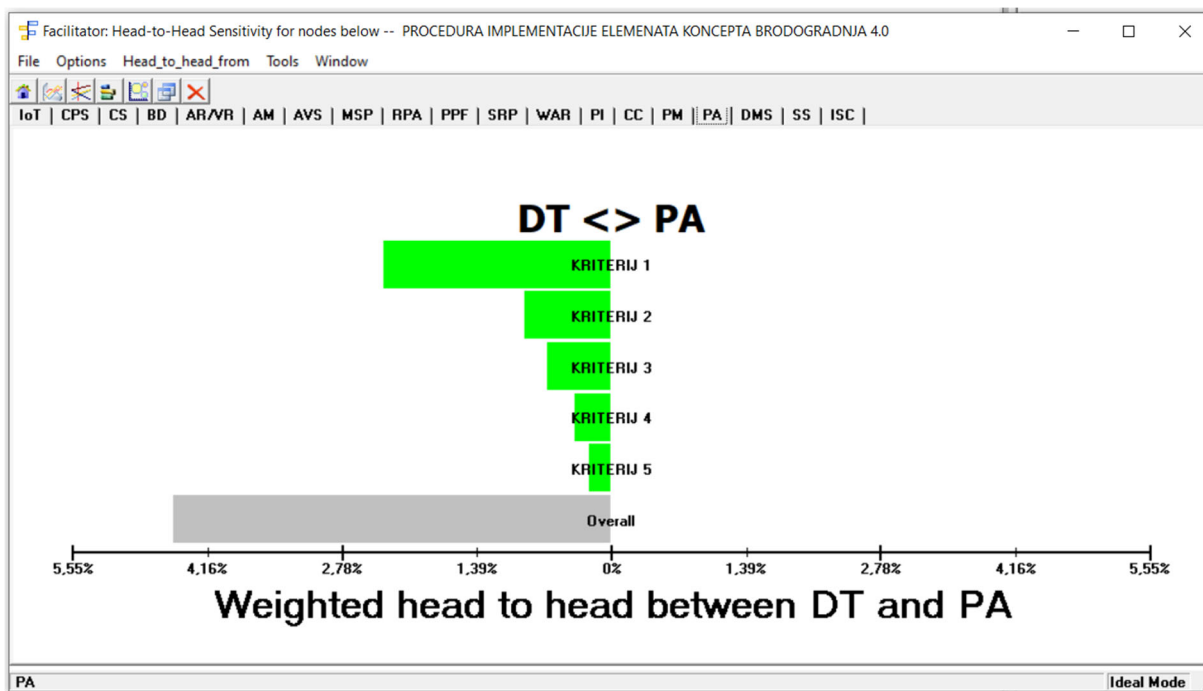
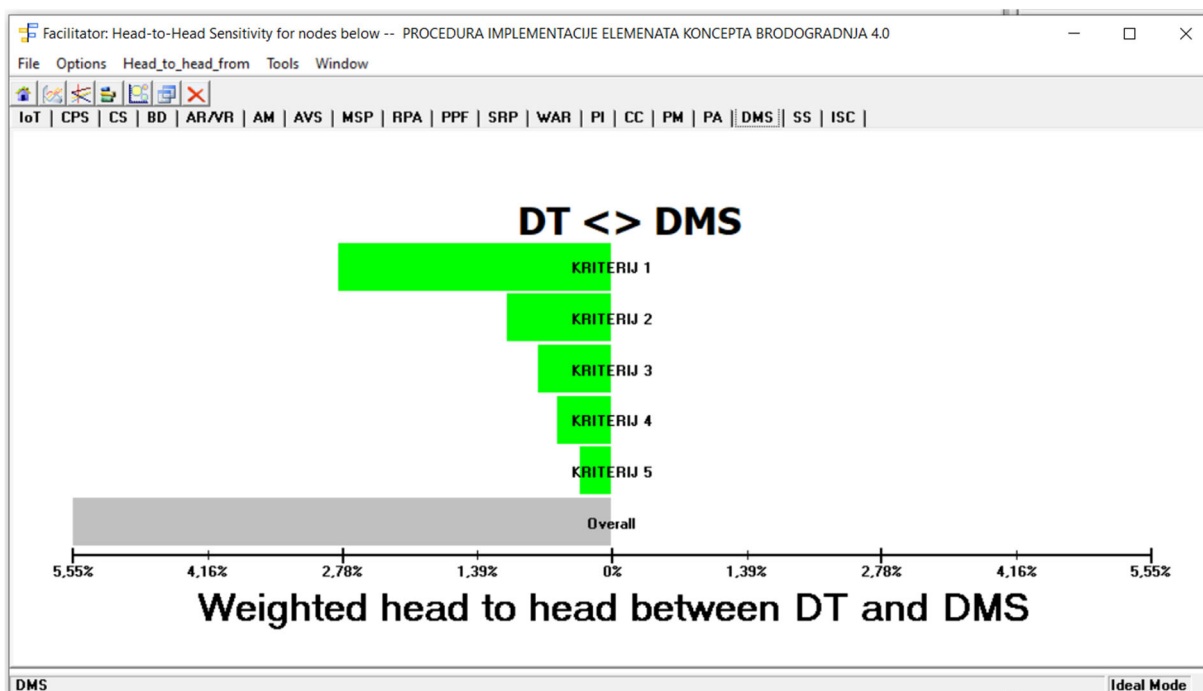
Slika P3.11 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa AR/VR*Slika P3.12 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa AVS*

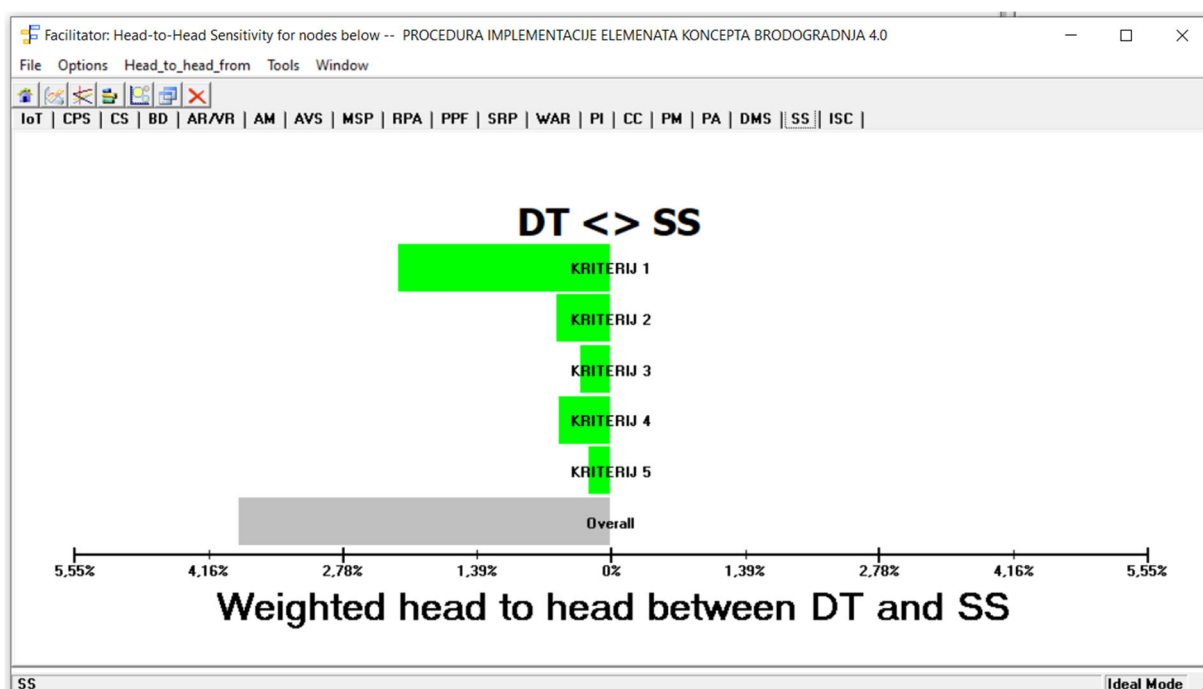
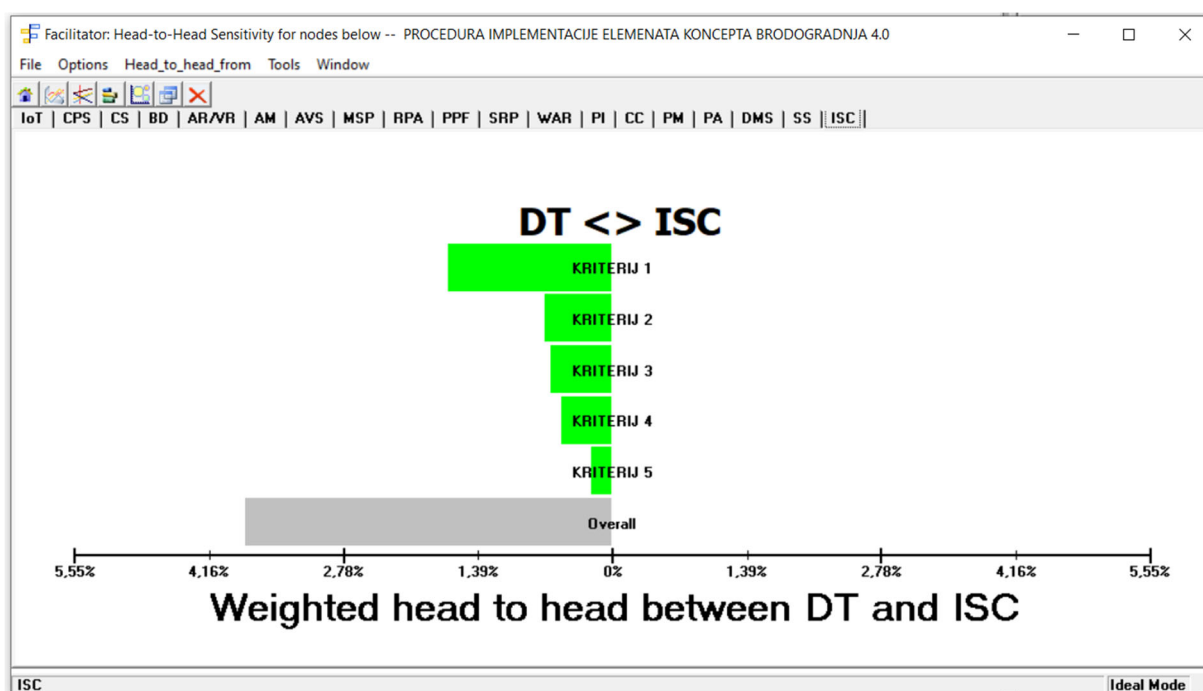
Slika P3.13 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa MSP*Slika P3.14 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa RPA*

Slika P3.15 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa PPF*Slika P3.16 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa SRP*

Slika P3.17 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa WAR*Slika P3.18 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa PI*

Slika P3.19 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa CC*Slika P3.20 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa PM*

Slika P3.21 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa PA*Slika P3.22 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa DMS*

Slika P3.23 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa SS*Slika P3.24 Analiza dijagramom sučeljavanja *elementa DT* i *elementa ISC*

Tablica br. P3.1 Procjena omjera težina kriterija uspoređivanjem u parovima korištenjem Saaty-eve skale s izračunima prioriteta *AHP* metodom

PROCJENA OMJERA TEŽINA KRITERIJA	CIJENA INVESTICIJE	POVEĆANJE PRODUKTIVNOSTI	POVEĆANJE KVALITETE	VREMENSKI PERIOD IMPLEMENTACIJE	SLOŽENOST IMPLEMENTACIJE		CIJENA INVESTICIJE	POVEĆANJE PRODUKTIVNOSTI	POVEĆANJE KVALITETE	VREMENSKI PERIOD IMPLEMENTACIJE	SLOŽENOST IMPLEMENTACIJE	SUMA PO REODVIMA	PRIORITETI
CIJENA INVESTICIJE	1	3	5	5	5		0,52	0,51	0,60	0,41	0,33	2,37	0,475
POVEĆANJE PRODUKTIVNOSTI	1/3	1	1	3	3		0,17	0,18	0,12	0,25	0,20	0,92	0,185
POVEĆANJE KVALITETE	1/5	1	1	3	1		0,10	0,18	0,12	0,25	0,07	0,72	0,144
VREMENSKI PERIOD IMPLEMENTACIJE	1/5	1/3	1/3	1	5		0,10	0,06	0,04	0,08	0,33	0,62	0,124
SLOŽENOST IMPLEMENTACIJE	1/5	1/3	1	1/5	1		0,10	0,06	0,12	0,02	0,07	0,36	0,072
SUMA PO STUPCIMA	1,93	5,67	8,33	12,20	15,00							SUMA:	1

Tablica P3.2 Usporedba odabranih elemenata koncepta u parovima korištenjem *Saaty-eve* skale prema kriteriju 1 (*cijena investicije*) s izračunom pripadajućih lokalnih prioriteta *AHP metodom*.

USPOREDBA U PAROVIMA PO KRITERIJU 1 CIJENA INVESTICIJE	Internet stvari (IoT)	Kibernetiko – fizički sustavi (CPS)	Digitalni bilzamac (DT)	Kibernetika sigurnost (CS)	Velika baza podataka (BD)	Virtuelna i proširena stvarnost (AR/VR)	Aditivna proizvodnja (AM)	Autonomni transport (AVS)	Modeliranje i simuliranje procesa (MPS)	Robotika automatizacija procesa (RPA)	Fleksibilnost proizvodnog procesa (PPF)	Pametno napredno planiranje u vremenu (SRP)	Automatizacija i robotizacija procesa skladištenja (WAR)	Progresivno RFID povezivanje (PI)	Rad u sigurnom oblaku (CC)	Prediktivno održavanje (PM)	Prediktivna analitika (PA)	Podrška donošenju odluka (DSM)	Sustav samooptimizacije (SS)	Integrirana nabava (ISC)
Internet stvari (IoT)	1	1	1/5	3	5	7	7	7	5	1	3	7	5	7	1	5	7	5	7	9
Kibernetiko – fizički sustavi (CPS)	1	1	1	5	5	7	7	7	7	5	5	1/5	3	1	5	7	7	7	7	9
Digitalni bilzamac (DT)	5	1	1	7	7	7	7	7	5	3	7	7	5	1	3	7	5	7	7	9
Kibernetika sigurnost (CS)	1/3	1/5	1/7	1	1/3	1/5	5	1/3	3	1/3	1	5	1/3	3	1/3	1/5	1	5	3	5
Velika baza podataka (BD)	1/5	1/5	1/7	3	1	1	1/3	1/3	1/3	1	1/5	5	1	3	1	1/3	1/5	5	1/3	7
Virtuelna i proširena stvarnost (AR/VR)	1/7	1/7	1/7	5	1	1	1/3	1/5	1/3	1	1	1	3	1/3	1/3	3	5	7	5	3
Aditivna proizvodnja (AM)	1/7	1/7	1/7	1/5	3	3	1	3	1/3	1/7	1/3	1/7	1	3	5	1/7	1/3	3	1	5
Autonomni transport (AVS)	1/5	1/7	1/7	3	3	5	1/3	1	1/7	1/3	1	1	3	1/7	1/3	1/5	3	5	1	5
Modeliranje i simuliranje procesa (MSP)	1	1/7	1/5	1/3	3	3	3	3	7	1	1	5	7	1/7	1/3	5	5	7	1/7	5
Robotika automatizacija procesa (RPA)	1/3	1/5	1/3	3	1	1	7	3	1	1	1/3	1/5	5	1/7	5	1/5	7	1/3	1/5	5
Fleksibilnost proizvodnog procesa (PPF)	1/7	1/5	1/7	1	5	1	3	1	1	3	1	1/7	7	1/7	5	3	5	1/5	1/3	5
Pametno napredno planiranje u vremenu (SRP)	1/7	5	1/7	1/5	1/5	1	7	1	1/5	5	7	1	1/3	7	1/5	1/3	3	5	1/5	1/3
Automatizacija i robotizacija procesa skladištenja (WAR)	1/5	1/3	1/5	3	1	1/3	1	1/3	1/7	1/5	1/7	3	1	1/5	3	1/7	1/3	1/5	3	1
Progresivno RFID povezivanje (PI)	1	1	1	1/3	1/3	3	1/3	7	7	7	7	1/7	5	1	7	5	3	5	7	7
Rad u sigurnom oblaku (CC)	1/3	1/5	1/3	5	1	3	1/5	3	1/3	1/5	1/5	5	1/3	1/7	1	1/5	1/5	3	1	1
Prediktivno održavanje (PM)	1/7	1/7	1/7	3	3	1/3	7	5	1/5	5	1/3	3	7	1/5	5	1	1/7	1	1/5	1
Prediktivna analitika (PA)	1/5	1/7	1/5	1	5	1/5	3	1/3	1/5	1/7	1/5	1/3	3	1/3	5	7	1	1/3	1	1/3
Podrška donošenju odluka (DSM)	1/7	1/7	1/7	1/5	1/5	1/7	1/3	1/5	1/7	3	5	1/5	5	1/5	1/3	1	3	1	3	5
Sustav samooptimizacije (SS)	1/7	1/7	1/7	1/3	3	1/5	1	1	7	5	3	5	1/3	1/7	1	5	1	1/3	1	1
Integrirana nabava (ISC)	1/9	1/9	1/9	1/5	1/7	1/3	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	3	1	1/7	1	1	3	1/5	1	1

LOKALNI PRIORITETI

0,0675

0,0609

0,0805

0,0401

0,0408

0,0701

0,0402

0,0465

0,0787

0,0529

0,0411

0,0402

0,0347

0,0747

0,0616

0,0385

0,0311

0,0211

0,0341

0,0446

Tablica P3.3 Usporedba elemenata koncepta u parovima korištenjem *Saaty*-eve skale prema kriteriju 2 (*povećanje produktivnosti*) s izračunom pripadajućih lokalnih prioriteta *AHP* metodom.

USPOREDBA U PAROVIMA PO KRITERIJU 2 POVEĆANJE PRODUKTIVNOSTI	Internet stvari (IoT)	Kibernetiko – fizički sustavi (CPS)	Digitalni bilzanc (DT)	Kibernetika sigurnost (CS)	Velika baza podataka (BD)	Virtualna i proširena stvarnost (AR/VR)	Aditivna proizvodnja (AM)	Autonomni transport (AVS)	Modeliranje i simuliranje procesa (MPS)	Robotska automatizacija procesa (RPA)	Fleksibilnost proizvodnog procesa (PPF)	Pametno napredno planiranje u vremenu (SRP)	Automatizacija i robotizacija procesa skladištenja (WAR)	Progresivno RFID povezivanje (PI)	Rad u sigurnom oblaku (CC)	Prediktivno održavanje (PM)	Prediktivna analitika (PA)	Podrška donošenju odluka (DSM)	Sustav samooptimizacije (SS)	Integrirana nabava (ISC)
Internet stvari (IoT)	1	1	7	1	7	5	3	5	7	7	3	5	5	7	1/3	3	5	5	7	7
Kibernetiko – fizički sustavi (CPS)	1	1	1/5	5	1	5	7	3	1/5	1	5	1/3	7	7	5	7	5	7	3	5
Digitalni bilzanc (DT)	1/7	5	1	3	7	5	7	7	5	7	5	5	7	1	3	7	5	3	3	7
Kibernetika sigurnost (CS)	1	1/5	1/3	1	1	1/7	1/3	1	3	5	1/3	1	3	1/5	1	3	1/5	1/5	1	5
Velika baza podataka (BD)	1/7	1	1/7	1	1	1/5	1/3	1/5	3	5	1/7	3	5	1/7	1	5	3	1/5	1/7	5
Virtualna i proširena stvarnost (AR/VR)	1/5	1/5	1/5	7	5	1	5	5	3	1/5	7	1/5	7	1/7	1/5	1/3	5	1/3	1/5	7
Aditivna proizvodnja (AM)	1/3	1/7	1/7	3	3	1/5	1	1	1/3	1/5	1	5	1/5	3	1/5	5	1	3	1/7	1/5
Autonomni transport (AVS)	1/5	1/3	1/7	1	5	1/5	1	1	7	5	1/7	3	5	1/5	5	1/3	3	1	5	3
Modeliranje i simuliranje procesa (MPS)	1/7	5	1/5	1/3	1/3	1/3	3	1/7	1	7	5	5	1/3	5	5	3	1/3	5	1/3	7
Robotska automatizacija procesa (RPA)	1/7	1	1/7	1/5	1/5	5	5	1/5	1/7	1	5	3	5	1/7	5	3	5	1/3	5	7
Fleksibilnost proizvodnog procesa (PPF)	1/3	1/5	1/5	3	7	1/7	1	7	1/5	1/5	1	5	3	5	1/5	1/3	5	1/7	5	7
Pametno napredno planiranje u vremenu (SRP)	1/5	3	1/7	1	1/3	5	1/5	1/3	1/5	1/3	1/5	1	1	1	1/5	3	3	1/3	1/3	1
Automatizacija i robotizacija procesa skladištenja (WAR)	1/7	1/7	1	1/3	1/5	1/7	5	1/5	3	1/5	1/3	1	1	1/7	7	1/5	1/3	5	1/7	3
Progresivno RFID povezivanje (PI)	3	1/7	1/3	5	7	7	1/3	5	1/5	7	1/5	1	7	1	7	5	5	7	3	7
Rad u sigurnom oblaku (CC)	1/3	1/5	1/7	1	1	5	5	1/5	1/5	1/5	5	5	1/7	1/7	1	1	1/3	1/7	1	1
Prediktivno održavanje (PM)	1/5	1/7	1/5	1/3	1/5	3	1/5	3	1/3	1/3	3	1/3	5	1/5	1	1	3	3	1/3	1/3
Prediktivna analitika (PA)	1/5	1/5	1/5	5	1/3	1/5	1	1/3	3	1/5	1/5	1/3	3	1/5	2	1/3	1	1/5	1/5	3
Podrška donošenju odluka (DSM)	1/7	1/7	1/3	5	5	3	1/3	1	1/5	3	7	3	1/5	1/7	7	1/3	5	1	7	1
Sustav samooptimizacije (SS)	1/7	1/3	1/3	1	7	5	7	1/5	3	1/5	1/5	3	7	1/3	1	3	5	1/7	1	1
Integrirana nabava (ISC)	1/7	1/5	1/7	1/5	1/5	1/7	5	1/3	1/7	1/7	1/7	1	1/3	1/7	1	3	1/3	1	1	1
LOKALNI PRIORITETI																				
0,0667																				
0,0612																				
0,0793																				
0,0411																				
0,0558																				
0,0616																				
0,0314																				
0,0305																				
0,0699																				
0,0538																				
0,0415																				
0,0512																				
0,0489																				
0,0725																				
0,0655																				
0,0278																				
0,0306																				
0,0205																				
0,0486																				
0,0416																				

Tablica P3.4 Usporedba elemenata koncepta u parovima korištenjem *Saaty*-eve skale prema kriteriju 3 (*povećanje kvalitete*) s izračunom pripadajućih lokalnih prioriteta *AHP* metodom.

USPOREDBA U PAROVIMA PO KRITERIJU 3 POVEĆANJE KVALITETE	Internet stvari (IoT)	Kibernetiko – fizički sustavi (CPS)	Digitalni biznasci (DT)	Kibernetika sigurnost (CS)	Velika baza podataka (BD)	Virtuelna i proširena stvarnost (AR/VR)	Aditivna proizvodnja (AM)	Autonomni transport (AVS)	Modeliranje i simuliranje procesa (MPS)	Robotika automatizacija procesa (RPA)	Fleksibilnost proizvodnog procesa (PPF)	Pametno napredno planiranje u vremenu (SRP)	Automatizacija i robotizacija procesa skladištenja (WAR)	Progresivno RFID povezivanje (PI)	Rad u sigurnom oblaku (CC)	Prediktivno održavanje (PM)	Prediktivna analitika (PA)	Podrška donošenju odluka (DSM)	Sustav samooptimizacije (SS)	Integrirana nabava (ISC)	LOKALNI PRIORITETI
Internet stvari (IoT)	1	1	1	5	5	1	3	7	1	5	7	7	7	7	1/3	1/5	7	5	3	5	0,0695
Kibernetiko – fizički sustavi (CPS)	1	1	1/3	5	5	3	1/3	7	5	3	5	5	7	1	5	7	5	7	3	3	0,0614
Digitalni biznasci (DT)	1	3	1	5	7	5	7	3	7	7	5	5	7	7	7	7	7	5	3	5	0,0771
Kibernetika sigurnost (CS)	1/5	1/5	1/5	1	1	1/3	5	5	1/3	1/5	1/5	3	1/7	1/7	5	5	5	1/3	3	7	0,0403
Velika baza podataka (BD)	1/5	1/5	1/7	1	1	1/7	5	1/5	1/3	1/5	1/5	3	1	1/7	3	5	5	5	3	1/3	0,0492
Virtuelna i proširena stvarnost (AR/VR)	1	1/3	1/5	3	7	1	7	5	1/5	5	3	1/5	7	1/5	1/3	1	1	1/5	5	1/3	0,0614
Aditivna proizvodnja (AM)	1/3	3	1/7	1/5	1/5	1/7	1	1/5	1/3	5	1/5	1/3	1/5	1/7	1/3	1	1	1/3	1/5	1/5	0,0396
Autonomni transport (AVS)	1/7	1/7	1/3	1/5	5	1/5	5	1	1/3	3	1	5	1/3	1/5	3	1/5	1/3	1/3	1/5	1	0,0483
Modeliranje i simuliranje procesa (MPS)	1	1/5	1/7	3	3	5	3	3	1	7	5	5	3	5	1/3	1/5	3	3	1/5	1/5	0,0646
Robotika automatizacija procesa (RPA)	1/5	1/3	1/7	5	5	1/5	1/5	1/3	1/7	1	1	7	5	1/7	5	1/3	5	1	1	1	0,0528
Fleksibilnost proizvodnog procesa (PPF)	1/7	1/5	1/5	5	5	1/3	5	1	1/5	1	1	1/3	1/3	1/7	1/5	3	5	1	3	1/5	0,0318
Pametno napredno planiranje u vremenu (SRP)	1/7	1/5	1/5	1/3	1/3	5	3	1/5	1/5	1/7	3	1	1/7	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	3	1	0,0519
Automatizacija i robotizacija procesa skladištenja (WAR)	1/7	1/7	1/7	7	1	1/7	5	3	1/3	1/5	3	7	1	1/7	3	1/5	1	1	1/3	1/3	0,0421
Progresivno RFID povezivanje (PI)	1/7	1	1/7	7	7	5	7	5	1/5	7	7	5	7	1	5	7	5	7	5	5	0,0795
Rad u sigurnom oblaku (CC)	3	1/5	1/7	1/5	1/3	3	3	1/3	3	1/5	5	5	1/3	1/5	1	5	3	5	1/3	3	0,0665
Prediktivno održavanje (PM)	5	1/7	1/7	1/5	1/5	1	1	5	5	3	1/3	3	5	1/7	1/5	1	3	5	3	3	0,0214
Prediktivna analitika (PA)	1/7	1/5	1/7	1/5	1/5	1	1	3	1/3	1/5	1/5	3	1	1/5	1/3	1/3	1	1	3	1	0,0305
Podrška donošenju odluka (DSM)	1/5	1/7	1/5	3	1/5	5	3	3	1/3	1	1	3	1	1/7	1/5	1/5	1	1	1	3	0,0243
Sustav samooptimizacije (SS)	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/5	5	5	5	1	1/3	1/3	3	1/5	3	1/3	1/3	1	1	1/3	0,0551
Integrirana nabava (ISC)	1/5	1/3	1/5	1/7	3	3	5	1	5	1	5	1	3	1/5	1/3	1/3	1	1/3	3	1	0,0327

Tablica P3.5 Usporedba elemenata koncepta u parovima korištenjem *Saaty*-eve skale prema kriteriju 4 (*vremenski period implementacije*) s izračunom pripadajućih lokalnih prioriteta *AHP* metodom.

USPOREDBA U PAROVIMA PO KRITERIJU 4 VREMENSKI PERIOD IMPLEMENTACIJE	LOKALNI PRIORITETI																				
	Internet stvari (IoT)	Kibernetiko – fizički sustavi (CPS)	Digitalni bilzamac (DT)	Kibernetika sigurnost (CS)	Velika baza podataka (BD)	Virtualna i proširena stvarnost (AR/VR)	Aditivna proizvodnja (AM)	Autonomni transport (AVS)	Modeliranje i simuliranje procesa (MPS)	Robotska automatizacija procesa (RPA)	Fleksibilnost proizvodnog procesa (PPF)	Pametno napredno planiranje u vremenu (SRP)	Automatizacija i robotizacija procesa skladištenja (WAR)	Progresivno RFID povezivanje (PI)	Rad u sigurnom oblaku (CC)	Prediktivno održavanje (PM)	Prediktivna analitika (PA)	Podrška donošenju odluka (DSM)	Sustav samooptimizacije (SS)	Integrirana nabava (ISC)	
USPOREDBA U PAROVIMA PO KRITERIJU 4 VREMENSKI PERIOD IMPLEMENTACIJE	Internet stvari (IoT)	1	1	1/7	3	3	5	7	7	1/7	5	5	1/3	1/3	3	3	3	5	5	5	7
	Kibernetiko – fizički sustavi (CPS)	1	1	3	5	1/5	3	5	1	1	5	1/5	7	5	1/5	1/5	1	1	5	3	5
	Digitalni bilzamac (DT)	7	1/3	1	7	5	5	7	5	5	3	1/3	5	7	5	3	5	3	5	3	7
	Kibernetika sigurnost (CS)	1/3	1/5	5	1	5	7	5	5	1/5	3	1/4	4	5	3	1/5	1	1	1/3	1/7	1/5
	Velika baza podataka (BD)	1/3	5	1/7	1/5	1	5	7	1	1/7	1/5	1/5	5	3	1/3	1	5	3	3	1/3	1
	Virtualna i proširena stvarnost (AR/VR)	1/5	1/3	1/5	1/7	1/5	1	5	1/5	5	1/3	1/3	7	5	7	1	1/3	1	1	1	3
	Aditivna proizvodnja (AM)	1/7	1/5	1/7	1/5	1/7	1/5	1	1/3	5	3	1/3	1/5	5	3	1	5	3	3	1/3	1
	Autonomni transport (AVS)	1/7	1	1/5	1/5	1	5	3	1	7	3	1/3	5	1/5	1/7	7	3	5	1	5	3
	Modeliranje i simuliranje procesa (MPS)	7	1	1/5	5	7	1/5	1/5	1/7	1	7	5	3	1/5	1/7	3	3	1	1	5	1/3
	Robotska automatizacija procesa (RPA)	1/5	1/5	1/3	1/3	5	3	1/3	1/3	1/7	1	3	4	5	1/5	1/7	3	1	5	1/7	5
	Fleksibilnost proizvodnog procesa (PPF)	1/5	5	3	4	5	3	3	3	1/5	1/3	1	7	5	1/7	5	1/5	1/3	1	1	3
	Pametno napredno planiranje u vremenu (SRP)	3	1/7	1/5	1/4	1/5	1/7	5	1/5	1/3	1/4	1/7	1	5	1/7	1/5	5	3	1	3	5
	Automatizacija i robotizacija procesa skladištenja (WAR)	3	1/5	1/7	1/5	1/3	1/5	1/5	5	5	1/5	1/5	1/5	1	1/5	1/5	1/5	1/3	1	3	1/7
	Progresivno RFID povezivanje (PI)	1/3	5	1/5	1/3	3	1/7	1/3	7	7	5	7	7	5	1	7	5	1	5	1/3	5
	Rad u sigurnom oblaku (CC)	1/3	5	1/3	5	1	1	1	1/7	1/3	7	1/5	5	5	1/7	1	5	7	5	1	1/3
	Prediktivno održavanje (PM)	1/3	1	1/5	1	1/5	3	1/5	1/3	1/3	1/3	5	1/5	5	1/5	1/5	1	1	1/3	1/3	3
Prediktivna analitika (PA)	1/5	1	1/3	1	1/3	1	1/3	1/5	1	1	3	1/3	3	1	1/7	1	1	1/7	1/3	1	
Podrška donošenju odluka (DSM)	1/5	1/5	1/5	3	1/3	1	1/3	1/5	1	1/5	1	1	1	1/5	1/5	3	7	1	1	3	
Sustav samooptimizacije (SS)	1/5	1/3	1/3	7	3	1	3	1/5	1/5	7	1	1/3	1/3	3	1	3	3	1	1	1/3	
Integrirana nabava (ISC)	1/7	1/5	1/7	5	1	1/3	1	1/3	3	1/5	1/3	1/5	7	1/5	3	1/3	1	1/3	1/3	1	

Tablica P3.6 Usporedba elemenata koncepta u parovima korištenjem *Saaty*-eve skale prema kriteriju 5 (*složenost implementacije*) s izračunom pripadajućih lokalnih prioriteta *AHP* metodom.

USPOREDBA U PAROVIMA PO KRITERIJU 5 SLOŽENOST IMPLEMENTACIJE	LOKALNI PRIORITETI																				
	Internet stvari (IoT)	Kibernetiko – fizički sustavi (CPS)	Digitalni biznasci (DT)	Kibernetika sigurnost (CS)	Velika baza podataka (BD)	Virtualna i proširena stvarnost (AR/VR)	Aditivna proizvodnja (AM)	Autonomni transport (AVS)	Modeliranje i simuliranje procesa (MPS)	Robotika automatizacija procesa (RPA)	Fleksibilnost proizvodnog procesa (PPF)	Pametno napredno planiranje u vremenu (SRP)	Automatizacija i robotizacija procesa skladištenja (WAR)	Progresivno RFID povezivanje (PI)	Rad u sigurnom oblaku (CC)	Prediktivno održavanje (PM)	Prediktivna analitika (PA)	Podrška donošenju odluka (DSM)	Sustav samooptimizacije (SS)	Integrirana nabava (ISC)	
Internet stvari (IoT)	1	1	1	1	7	1/7	5	1/2	1/3	7	1/7	1/5	1/7	1/3	3	1/4	1/4	1/3	7	3	5
Kibernetiko – fizički sustavi (CPS)	1	1	1	3	4	5	7	1/3	1/5	3	1	1/3	5	5	5	3	3	5	1/3	5	7
Digitalni biznasci (DT)	1	1	1	7	5	7	7	5	3	7	3	1/3	1/5	1/3	5	1/5	3	1/5	1/5	1/4	3
Kibernetika sigurnost (CS)	1	1/3	1/7	1	5	1/4	7	5	1/3	1/5	1/7	5	5	1	1	5	1	1/3	1/3	1	1
Velika baza podataka (BD)	1/7	1/4	1/5	1/5	1	1/5	3	1/3	3	1/3	5	1/5	1/3	1/3	4	5	1	1/3	1/3	1/3	5
Virtualna i proširena stvarnost (AR/VR)	7	1/5	1/7	4	5	1	1/2	2	7	5	3	1/7	1/5	5	1/3	7	7	1/5	5	1	1
Aditivna proizvodnja (AM)	1/5	1/7	1/7	1/7	1/3	2	1	1/2	1	1	1	1/3	1/3	1/2	3	3	1/5	1	1	3	2
Autonomni transport (AVS)	2	3	1/5	1/5	3	1/2	2	1	1/7	1/7	1/3	1/3	1	1	3	1/3	1/3	1/3	2	2	3
Modeliranje i simuliranje procesa (MPS)	3	5	1/3	3	1/3	1/7	1	7	1	1/4	5	5	7	7	5	3	1/5	1/5	1/5	1/3	3
Robotika automatizacija procesa (RPA)	1/7	1/3	1/7	5	3	1/5	1	7	4	1	1/5	3	1/5	1/7	3	1/7	5	3	4	1/4	1/4
Fleksibilnost proizvodnog procesa (PPF)	7	1	1/3	7	1/5	1/3	1	3	1/5	5	1	2	1/3	4	2	3	1	1	1/2	2	2
Pametno napredno planiranje u vremenu (SRP)	5	3	3	1/5	5	7	3	3	1/5	1/3	1/2	1	3	1/5	1/3	1/3	5	1	1/2	3	3
Automatizacija i robotizacija procesa skladištenja (WAR)	7	1/5	5	1/5	3	5	3	1	1/7	5	3	1/3	1	1/5	1/5	1/5	3	5	3	1/3	1/3
Progresivno RFID povezivanje (PI)	1/3	1/5	3	1	3	1/5	2	1	1/7	7	1/4	5	5	1	5	1/3	4	1/2	3	1	1
Rad u sigurnom oblaku (CC)	4	1/3	1/5	1	1/4	3	1/3	1/3	1/5	1/3	1/2	3	5	1/5	1	1/3	1/4	7	4	3	3
Prediktivno održavanje (PM)	4	1/5	5	1/5	1/5	1/7	1/3	3	1/3	7	1/3	3	5	3	3	1	1/2	1/3	2	1	1
Prediktivna analitika (PA)	3	1/5	1/3	1	1	1/7	5	3	5	1/5	1	1/5	1/3	1/4	4	2	1	5	7	5	5
Podrška donošenju odluka (DSM)	1/7	3	5	3	3	5	1	2	5	1/3	1	1	1/5	2	1/7	3	1/5	1	1/2	1	1
Sustav samooptimizacije (SS)	1/3	1/5	4	3	3	1/5	1/3	1/2	3	1/4	2	2	1/3	1/3	1/4	1/2	1/7	2	1	1/5	1/5
Integrirana nabava (ISC)	1/5	1/7	1/3	1	1/5	1	1/2	1/3	1/3	4	1/2	1/3	3	1	1/3	1	1/5	1	5	1	1

Tablica P3.7 Izračun ukupnih prioriteta prema kriterijima i lokalnim prioritetima pomoću *AHP* metode

LOKALNI PRIORITETI ELEMENATA KONCEPTA PREMA POJEDINIM KRITERIJIMA		KRITERIJI					UKUPNI PRIORITETI ELEMENATA KONCEPTA
		CUJENA INVESTICIJE	POVEĆANJE PRODUKTIVNOSTI	POVEĆANJE KVALITETE	VREMENSKI PERIOD IMPLEMENTACIJE	SLOŽENOST IMPLEMENTACIJE	
PRIORITETI KRITERIJA		0,475	0,185	0,144	0,124	0,072	
ODABRANI ELEMENTI KONCEPTA	INTERNET STVARI (IoT)	0,0675	0,0667	0,0695	0,0682	0,0641	0,0675
	KIBERNETSKO-FIZIČKI SUSTAVI (CPS)	0,0609	0,0612	0,0614	0,0514	0,0512	0,0591
	DIGITALNI BLIZANAC (DT)	0,0805	0,0793	0,0771	0,0765	0,0737	0,0788
	KIBERNETSKA SIGURNOST (CS)	0,0401	0,0411	0,0403	0,0488	0,0482	0,0431
	VELIKA BAZA PODATAKA (BD)	0,0409	0,0558	0,0492	0,0574	0,0421	0,0470
	VIRTUALNA I PROŠIRENA STVARNOST (AR/VR)	0,0701	0,0616	0,0614	0,0658	0,0616	0,0661
	ADITIVNA PROIZVODNJA (AM)	0,0402	0,0314	0,0396	0,0398	0,0381	0,0383
	AUTONOMNI TRANSPORT (AVS)	0,0465	0,0305	0,0483	0,0344	0,0449	0,0422
	MODELIRANJE I SIMULIRANJE PROIZVODA I PROCESA (MSP)	0,0787	0,0699	0,0646	0,0695	0,0674	0,0731
	ROBOTSKA AUTOMATIZACIJA PROCESA (RPA)	0,0529	0,0538	0,0528	0,0544	0,0536	0,0533
	FLEKSIBILNOST PROIZVODNOG PROCESA (PPF)	0,0411	0,0415	0,0318	0,0513	0,0523	0,0419
	PAMETNO NAPREDNO PLANIRANJE (SRP)	0,0402	0,0512	0,0519	0,0485	0,0504	0,0446
	AUTOMATIZACIJA I ROBOTIZACIJA SKLADIŠTENJA (WAR)	0,0347	0,0489	0,0421	0,0436	0,0434	0,0401
	PROGRESIVNO RFID POVEZIVANJE (PI)	0,0747	0,0725	0,0795	0,0649	0,0678	0,0733
	RAD U SIGURNOM OBLAKU (CC)	0,0616	0,0655	0,0665	0,0621	0,0619	0,0631
	PREDIKTIVNO ODRŽAVANJE (PM)	0,0385	0,0278	0,0214	0,0212	0,0243	0,0309
	PREDIKTIVNA ANALITIKA (PA)	0,0311	0,0306	0,0305	0,0452	0,0417	0,0334
	PODRŠKA DONOŠENJU ODLUKA (DSM)	0,0211	0,0205	0,0243	0,0308	0,0281	0,0232
	SUSTAV SAMOOPTIMIZACIJE (SS)	0,0341	0,0486	0,0551	0,0326	0,0419	0,0402
	INTEGRIRANA NABAVA (ISC)	0,0446	0,0416	0,0327	0,0336	0,0433	0,0409

PRIVITAK BR. 4.

Simulacijsko modeliranje – privitci s tablicama materijala za unos podataka

Privitak br.4 Specifikacija limova i profila za odabranu skupinu materijala za grupe nadgrađa

Tablica P4.1 Uzorak limova u analiziranoj odabranoj skupini materijala za grupe nadgrađa

Redni broj	Duljina (mm)	Širina (mm)	Debljina (mm)	Kvaliteta
1	12 000	2000	5	A36
2	12 000	2000	6,5	A36
3	12 000	2000	6	A36
4	12 000	2000	6	A36
5	12 000	2000	7,5	A36
6	12 000	2000	7	A36
7	12 000	2000	8,5	A36
8	12 000	2000	6	A36
9	12 000	2000	5	A36
10	12 000	2000	7	A36

Tablica P4.2 Uzorak profila u analiziranoj odabranoj skupini materijala za grupe nadgrađa

Tip	Dimenzija	Duljina (mm)	Visina (mm)	Debljina (mm)	Kvaliteta
HP	80 x 6.0	12000	80	6.0	A36
HP	80 x 8.5	12000	80	8.5	A36
HP	80 x 6.5	12000	80	6.5	A36
HP	80 x 7.0	12000	80	7.0	A36
HP	80 x 6.5	12000	80	6.5	A36
HP	80 x 6.0	12000	80	6.0	A36
HP	80 x 6.0	12000	80	6.0	A36
HP	80 x 8.5	12000	80	8.5	A36
HP	80 x 5.5	12000	80	5.5	A36
HP	80 x 6.5	12000	80	6.5	A36
HP	80 x 6.5	12000	80	6.5	A36
HP	80 x 7.0	12000	80	7.0	A36
HP	80 x 6.5	12000	80	6.5	A36
HP	80 x 7.5	12000	80	7.5	A36
HP	80 x 6.0	12000	80	6.0	A36
HP	80 x 5.5	12000	80	5.5	A36
HP	80 x 6.0	12000	80	6.0	A36

Tablica P4.3 Procjena vremena ciklusa za radnu stanicu (S3) panel linije

Panel	Broj profila	Broj limova	Debljina lima	Razmak uzdužnjaka	Duljina panela	Broj prolaza	Brzina zavarivanja
1	30	9	7	600	18000	1	1
2	30	9	7	600	18000	1	1
3	30	9	6	600	18000	1	1
4	30	9	6	600	18000	1	1
5	30	9	6	600	18000	1	1
6	30	9	6	600	18000	1	1
7	30	9	6	600	18000	1	1
8	30	9	5	600	18000	1	1
9	30	9	7	600	18000	1	1
10	30	9	7	600	18000	1	1

Tablica P4.4 Procjena vremena ciklusa za radnu stanicu (S1) rezanje profila

Redni broj	Broj profila	Duljina (mm)	Dimenzija (mm)	Brzina mm/min	Procesno vrijeme (min)	Vrijeme Ciklusa (min)
1	1	12000	80 x 6.0	650	37.20	68
2	1	12000	80 x 6.0	650	37.20	68
3	1	12000	80 x 6.5	650	37.20	68
4	1	12000	80 x 7.0	650	37.20	68
5	1	12000	80 x 6.5	650	37.20	68
6	1	12000	80 x 6.0	650	37.20	68
7	1	12000	80 x 6.0	650	37.20	68
8	1	12000	80 x 5.5	650	37.20	68
9	1	12000	80 x 5.5	650	37.20	68
Ukupno:	9			Ukupno vrijeme ciklusa za 9 profila:		680
				Vrijeme ciklusa po procesu rezanja profila: 75.55 min/profilu		

Tablica P4.5 Određivanje vremena ciklusa za radnu stanicu (S2) obilježavanje i obrada rubova limova

Redni broj	Duljina (mm)	Širina (mm)	Debljina (mm)	Brzina mm/min	Procesno vrijeme (min)	Vrijeme ciklusa (mm)
1	12 000	2000	5	600	46,66	77,76
2	12 000	2000	6	600	46,66	77,76
3	12 000	2000	6	600	46,66	77,76
4	12 000	2000	6	600	46,66	77,76
5	12 000	2000	6	600	46,66	77,76
6	12 000	2000	7	600	46,66	77,76
7	12 000	2000	6	600	46,66	77,76
8	12 000	2000	6	600	46,66	77,76
9	12 000	2000	5	600	46,66	77,76
10	12 000	2000	7	600	46,66	77,76
Ukupno:	10			Ukupno vrijeme ciklusa:		777,76
				Vrijeme ciklusa / limu:		77,76 min

Tablica P4.6 Određivanje vremena ciklusa za radnu stanicu rezanja limova

Redni broj	Duljina (mm)	Širina (mm)	Broj izreza	Brzina mm/min	Vrijeme postavljanja m/izrez	Procesno vrijeme (min)	Vrijeme Ciklusa (min)
1	450,2	310,5	4,00	950	1,0	6,61	10,6
2	493,2	134,4	2,00	950	1,0	2,72	4,72
3	268,8	268,8	4,00	950	1,0	1,17	5,17
4	134,4	134,4	4,00	950	1,0	4,33	8,33
5	175,4	175,4	5,00	950	1,0	3,81	8,81
6	150,4	150,4	2,00	950	1,0	1,30	3,30
7	343,4	589,2	4,00	950	1,0	8,10	12,1
8	164,2	164,2	7,00	950	1,0	14,99	21,9
9	212,4	212,4	10,00	950	1,0	9,23	19,23
10	125,4	125,4	7,00	950	1,0	14,9	16,09
Ukupno:			40		Ukupno vrijeme:		188,25
					Vrijeme ciklusa po limu:		<i>18,82 min</i>

Tablica P4.7 Određivanje vremena ciklusa za radnu stanicu (S4) postavljanja profila

Redni broj	Broj profila	Broj limova	Duljina (mm)	Brzina mm/min	Procesno vrijeme (min)	Vrijeme Ciklusa (min)
1	3	1	12000	3800	9,47	37,88
2	3	1	12000	3800	9,47	37,88
3	3	1	12000	3800	9,47	37,88
4	3	1	12000	3800	9,47	37,88
5	3	1	12000	3800	9,47	37,88
6	3	1	12000	3800	9,47	37,88
7	3	1	12000	3800	9,47	37,88
8	3	1	12000	3800	9,47	37,88
9	3	1	12000	3800	9,47	37,88
Ukupno:		9		Ukupno vrijeme ciklusa:		340,92
				Vrijeme ciklusa postavljanja profila: <i>37,88 min</i>		

Tablica P4.8 Određivanje vremena ciklusa za radnu stanicu (S4) zavarivanja profila

Redni broj	Broj profila	Broj limova	Duljina (mm)	Brzina Mm/min	Procesno vrijeme (min)	Vrijeme Ciklusa (min)
1	3	1	12000	680	52,94	70,59
2	3	1	12000	680	52,94	70,59
3	3	1	12000	680	52,94	70,59
4	3	1	12000	680	52,94	70,59
5	3	1	12000	680	52,94	70,59
6	3	1	12000	680	52,94	70,59
7	3	1	12000	680	52,94	70,59
8	3	1	12000	680	52,94	70,59
9	3	1	12000	680	52,94	70,59
Ukupno:		9		Ukupno vrijeme ciklusa:		635,29
				Vrijeme ciklusa po zavarenom limu: 70,58 min		

Tablica P4.9 Specifikacija limova ukupno

Redni broj	Duljina (mm)	Širina (mm)	Debljina (mm)	Kvaliteta	Broj komada
1	12 000	2000	5	A36	80
2	12 000	2000	5.5	A36	112
3	12 000	2000	6	A36	215
4	12 000	2000	6.5	A36	263
5	12 000	2000	7	A36	93
6	12 000	2000	7.5	A36	44
7	12 000	2000	8	A36	40
8	12 000	2000	8.5	A36	35
			Sveukupno:		882

Tablica P4.10 Specifikacija profila ukupno

Tip	Dimenija	Duljina (mm)	Kvaliteta	Broj komada
HP	80 x 5.0	12000	A36	225
HP	80 x 5.5	12000	A36	315
HP	80 x 6.0	12000	A36	459
HP	80 x 6.5	12000	A36	540
HP	80 x 6.8	12000	A36	644
HP	80 x 7.0	12000	A36	548
HP	80 x 7.4	12000	A36	126
HP	80 x 7.8	12000	A36	143
		Sveukupno:		3000

ŽIVOTOPIS

Venesa Stanić (djevojački Zujić) rođena je 09. listopada 1969. u Splitu, gdje je 1988. godine završila srednju matematičko-informatičku gimnaziju. Iste godine upisala je diplomski sveučilišni studij brodogradnje na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu. Diplomirala je 1995. godine studij brodogradnje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu i stekla zvanje mag.ing.nav.arch. (diplomirani inženjer brodogradnje).

Odmah nakon završetka studija zaposlila se u brodogradilištu „Brodosplit“ u Splitu gdje je radila do rujna 2021 kada odlazi raditi u Damen Schelde Naval Shipbuilding, Nizozemska gdje radi do danas. Tijekom radnog vijeka obavljala je niz različitih poslova i dužnosti: Projektant tehnologije gradnje broda, Samostalni projektant tehnologije gradnje broda te od 2006 kao Glavni projektant tehnologije gradnje broda i Glavni projektant Opreme broda. Od listopada 2021. u Damen Naval Schelde Shipbuilding, Nizozemska, radi kao Lead Engineer Outer Decks and Steel Outfitting, Team Lead Multidisciplinary Team i Lead Modelling Team.

Akadske godine 2012./2013. upisuje poslijediplomski doktorski studij znanstvenog područja Tehničkih znanosti, polje Brodogradnja, modul 4: Projektiranje i gradnja plovniha objekata na Tehničkom fakultetu u Rijeci, pod mentorstvom prof. Nikše Fafandjela. Od 2018. godine mentorstvo nad doktorandicom preuzimaju prof. dr.sc. Marko Hadjina i prof. dr.sc. Tin Matulja. Autorica i suautorica je 6 znanstvenih i stručnih radova.

Nastavnom djelatnošću bavi se tijekom 2013. i 2014. godine na Fakultetu elektrotehnike strojarstva i brodogradnje u Splitu. Tijekom 2016., 2017. i 2018. godine održava nastavu na Visokoj školi za inspektijski i kadrovski menadžment gdje je 2018. godine izabrana u zvanje Predavač.

Aktivno se služi engleskim jezikom, u govoru i pismu, te računalnim alatima iz programskog paketa MS Office (Word, Excel, Power Point), te alatima za grafički i računalni dizajn Autocad, Microstation i 3DX Experience.

Udata je i majka dvoje djece.

POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

Simpozij SORTA 2010	V.Stanić, „ <i>Tehnologija gradnje broda za prijevoz specijalnih tereta</i> “, Proceeding of XIX. Simpozija Teorije i prakse brodogradnje in memoriam prof. Leopold Sorta, SORTA 2010, Lumbarda, 07. – 09. listopada 2010, Zbornik radova 2010. UDK 629.5 (063), ISBN 978-953-290-022-4.
Konferencija IN-TECH 2015	V. Stanić, M. Hadjina, N. Fafandjel, „ <i>The Industry 4.0 concept and it's application in the Shipbuilding process</i> “, International Conference on Innovative Technologies, IN-TECH2015, Dubrovnik, 09. – 11.09.2015. ISSN 1849-0662.
Konferencija PEM 2015	V. Stanić, D. Kolić, N.Fafandjel, „ <i>Value Stream Mapping to meet the needs of Multiple Industries</i> “, 5th International Conference on Production Engineering and Management, Trieste, Italy, 01. – 02. 10.2015.
Simpozij SORTA 2016	V.Stanić, „ <i>Value Stream Mapping to transform Shipbuilding Process for Multiple Industries Constructions</i> “, Proceeding of XXII. Simpozija Teorije i prakse brodogradnje in memoriam prof. Leopold Sorta, SORTA 2016, Trogir, 22. – 23. listopada 2016, Zbornik radova 2016. ISSN 2459-6566.
Časopis BRODOGRADNJA	V. Stanić, N. Fafandjel, T. Matulja, „ <i>A Methodology for improving productivity of the existing shipbuilding process using modern production concepts and AHP method</i> “, Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike, Vol.68 No.3, 2017, ISSN 0007-215X, eISSN 1845-5859, UDC 629.5.081, Original scientific paper.
Časopis BRODOGRADNJA	V. Stanić, M. Hadjina, N. Fafandjel, T. Matulja, „ <i>Toward Shipbuilding 4.0 – An Industry 4.0 changing the face of the Shipbuilding Industry</i> “, Brodogradnja: Teorija

	i praksa brodogradnje i pomorske tehnike, Vol.69 No.3, 2018, ISSN 0007-215X, eISSN 1845-5859, UDC 629.5.081, Review paper.
--	--

PODACI O AUTORICI I DOKTORSKOM RADU

1. AUTORICA

Ime i prezime:	Venesa Stanić
Datum i mjesto rođenja:	09. listopada 1969., Split
Naziv fakulteta, studija i godine završetka diplomskog studija:	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 1995.
Sadašnje zaposlenje:	Damen Schelde Naval Shipbuilding, Nizozemska

2. DOKTORSKI RAD

Naslov:	Metodologija za odabir optimalnog postupka implementacije koncepta <i>Brodogradnja 4.0</i>
Broj stranica, slika, tablica i bibliografskih podataka:	200, 41, 19, 112
Znanstveno područje, polje i grana:	Tehničke znanosti, Brodogradnja, Projektiranje i gradnja plovniha objekata
Mentori:	prof.dr.sc. Marko Hadjina, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci prof. dr.sc. Tin Matulja, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci
Fakultet na kojem je rad obranjen:	Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci

3. OBRANA I OCJENA

Datum prijave teme:	17. srpnja 2018.
Datum predaje rada:	19. lipnja 2023.
Datum prihvatanja ocjene rada:	20. srpnja 2023.

	1) prof. dr.sc. Albert Zamarin, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci 2) izv. prof. dr. Sandro Doboviček, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci 3) izv. prof. dr. sc. Boris Ljubenković, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Splitu
Datum obrane:	05. rujna 2023.
Povjerenstvo za obranu:	1) prof. dr.sc. Albert Zamarin, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci 2) izv. prof. dr. Sandro Doboviček, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci 3) izv. prof. dr. sc. Boris Ljubenković, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Splitu
Datum promocije:	