

Prikaz i usporedba koncepata Industrije 4.0 i Industrije 5.0

Movre, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:170351>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-10**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Movre

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Tihomir Opetuk, mag. ing.

Dr. sc. Maja Trstenjak, mag. ing.

Student:

Ivan Movre

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Tihomiru Opetuku i komentorici dr. sc. Maji Trstenjak na ukazanoj pomoći i korisnim savjetima tijekom pisanja ovog rada.

Ivan Movre



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Movre** JMBAG: **0035223643**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Prikaz i usporedba koncepata Industrije 4.0 i Industrije 5.0**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Review and comparison of Industry 4.0 and Industry 5.0 concepts**

Opis zadatka:

Pojava pojma Industrije 4.0 2011. godine i predstavljanje na sajmu u Hannoveru 2013. godine predstavlja početak intenzivne digitalizacije proizvodnje. Pod digitalizacijom smatra se niz novih i inovativnih tehnoloških razvoja kao što su: informacijske i komunikacijske tehnologije, kibernetско-fizički sustavi, mrežne komunikacije, simulacije, modeliranje i virtualizacija u dizajnu proizvoda i definiranju proizvodnih procesa, prikupljanje velikih količina podataka, itd.

Sve navedeno dovodi do toga da uvođenje koncepta Industrije 4.0 u poduzeća zahtijeva dosta resursa i vremena. Upravo iz tog razloga vrlo je mali broj poduzeća koja su uvela koncept Industrije 4.0 u svoje poslovanje. Mnoga od njih postepeno uvode neke od gore navedenih elemenata u svoje poslovanje u skladu sa svojim mogućnostima. Može se zaključiti da će proći još dosta vremena prije nego poduzeća uvedu koncept Industrije 4.0, a već se pojavio pojam koncepta Industrije 5.0. Jedan od razloga za pojavu ovog koncepta je težnja Europske unije za zelenu i digitalnu transformaciju industrije. Ovim konceptom želi se staviti dobrobit radnika (eng. wellbeing) u središte proizvodnog procesa i koristi nove tehnologije za pružanje prosperiteta van radnog mjesta, odnosno uzima u obzir ograničenje resursa na planetu.

U radu je potrebno:

- Na temelju relevantnih izvora definirati koncept Industrije 4.0 i koncept Industrije 5.0.
- Napraviti pregled radova koji se bave navedenim konceptima.
- Istražiti područja djelovanja navedenih koncepata.
- Usporediti koncepte Industrije 4.0 i Industrije 5.0.
- Prikazati studije slučaja uvođenja navedenih koncepata.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Tihomir Opetuk

Dr. sc. Maja Trstenjak

Opetuk
Trstenjak

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS KRATICA	V
SAŽETAK	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. INDUSTRIJSKE (R)EVOLUCIJE	2
2.1. Industrija 1.0	2
2.2. Industrija 2.0	3
2.3. Industrija 3.0	3
2.4. Industrija 4.0	3
2.5. Industrija 5.0	4
3. INDUSTRIJA 4.0	6
3.1. Pojmovi povezani sa Industrijom 4.0	7
3.2. Značajke Industrije 4.0	14
3.3. Prednosti Industrije 4.0	17
3.4. Nedostatci Industrije 4.0	18
3.5. SWOT analiza Industrije 4.0	20
3.6. Uvođenje Industrije 4.0	21
3.6.1. Preduvjeti za uvođenje Industrije 4.0	21
3.6.2. Čimbenici spremnosti za uvođenje Industrije 4.0	22
3.7. Primjeri implementacije Industrije 4.0 u svijetu	25
3.7.1. Potencijalni benefiti uvođenja Industrije 4.0 na primjeru Njemačke	26
3.7.2. Smanjenje potrošnje energije na linijama za montažu vozila u stanju mirovanja	27
3.7.3. Ostvarivanje individualnih zahtjeva kupca	28
3.7.4. Siemensova tvornica PLC računala u Ambergu	29
3.7.5. Bosch Rexroth	30
3.7.6. Scania	30
3.8. Studije slučaja za Industrijom 4.0	31
3.8.1. Implementacija Matics sustava u pogon poduzeća Jolybar [38]	31
3.8.2. Transformacija tradicionalne tvornice u pametnu tvornicu s naglaskom na unutarnju logistiku i proizvodnju [39]	34
4. INDUSTRIJA 5.0	38
4.1. Industrija 5.0 – nastavak Industrije 4.0 ili njen nasljednik	39
4.2. Ključne značajke Industrije 5.0	41
4.3. Utjecaj Industrije 5.0 na proizvodne sustave	51
4.4. Ostvarivost Industrije 5.0	52
4.5. Spremnost na Industrijom 5.0	55
4.6. SWOT analiza Industrije 5.0	56
4.7. Studije slučaja povezane s konceptom Industrije 5.0	58

4.7.1. Razvoj pametne radionice s naglaskom na poboljšanje sigurnosti [67].....	58
4.7.2. Integracija kobota u proizvodnu liniju u obliku slova U [68]	61
5. USPOREDBA KONCEPATA INDUSTRIJE 4.0 I INDUSTRIJE 5.0	65
6. ZAKLJUČAK.....	69
LITERATURA.....	71
PRILOZI	76

POPIS SLIKA

Slika 1.	Pregled industrijskih revolucija kroz povijest [3]	2
Slika 2.	Transformacije revolucija prema važnim sudionicima i segmentima industrije [5]	4
Slika 3.	Pojmovi povezani s Industrijom 4.0 [11]	7
Slika 4.	Primjeri primjene Interneta stvari u proizvodnji [13]	8
Slika 5.	Kibernetско - fizički sustav [6].....	9
Slika 6.	Primjer pametne tvornice[16]	11
Slika 7.	Primjer horizontalne i vertikalne integracije [20]	16
Slika 8.	Preduvjeti implementacije Industrije 4.0 [6]	21
Slika 9.	6 dimenzija IMPULS metode[32]	23
Slika 10.	Kriterijsko stablo [31].....	25
Slika 11.	Rast produktivnosti [34]	26
Slika 12.	Porast broja zaposlenih [34]	27
Slika 13.	Današnji i budući izgled proizvodne linije[6].....	29
Slika 14.	Piramida pametne tvornice – Scania [37].....	30
Slika 15.	Prikaz postrojenja u Jolybar-u [38]	32
Slika 16.	Primjer proizvoda [39]	34
Slika 17.	Shema pametne tvornice [39]	36
Slika 18.	Prikaz koncepta Industrije 4.0, Industrije 5.0, njihovog hibrida kao teorija neizrazitih skupova [50]	41
Slika 19.	Ključne značajke Industrije 5.0 [54]	42
Slika 20.	Factory2Fit [56]	44
Slika 21.	Inteligentni prostor [57].....	44
Slika 22.	Veza resursa, korisnika i zadatka [57].....	45
Slika 23.	Presjek Industrije 5.0 i održivosti [60]	46
Slika 24.	Prednosti održivosti u Industrij 5.0 [60].....	48
Slika 25.	Izazovi implementacije održivosti [60]	49
Slika 26.	Primjer virtualnog treninga[41]	53
Slika 27.	Princip rada kobota [41]	54
Slika 28.	Primjer duboke neuronske mreže [41]	55
Slika 29.	Spremnost na Industrij 5.0 [66].....	56
Slika 30.	Područje prijema i čišćenja [67].....	58
Slika 31.	Područje rezanja [67].....	59
Slika 32.	Tlocrt radionice s implementiranim kamerama [67].....	59
Slika 33.	Struktura sustava za nadziranje [67]	60
Slika 34.	Tlocrt poluautomatske proizvodne linije [68]	62
Slika 35.	Proizvodna linija s integriranim kobotom [68]	63
Slika 36.	Prikaz promjene produktivnosti rada i površine kroz faze [68].....	64
Slika 37.	Ciljevi istraživanja povezani sa ključnim značajkama Industrije 5.0 [5].....	66

POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjeri uvođenja ranije navedenih tehnologija te njihov utjecaj na produktivnost proizvodnog procesa [17]	13
Tablica 2. SWOT analiza Industrije 4.0 koju je provela Europska unija [19]	20
Tablica 3. Dimenzije poduzeća prema Industry 4.0 Maturity Model-u [33]	23
Tablica 4. Povezanost značajki Industrije 5.0 s ljudima, organizacijom i tehnologijom u praktičnom kontekstu [51]	51
Tablica 5. Broj intervjuiranih poduzeća po vrsti industrije [66]	55
Tablica 6. SWOT analiza Industrije 5.0 [44]	57
Tablica 7. Rezultati mjerenja [68]	63
Tablica 8. Razlike Industrije 4.0 i Industrije 5.0 [66].....	67

POPIS KRATICA

IoT – eng. Internet of Things – Internet stvari

RtOI – eng. Real time operational intelligence – operativna inteligencija u stvarnom vremenu

MES – eng. Manufacturing execution system – sustav izvedbe proizvodnje

ERP – eng. Enterprise resource planning – sustav planiranja resursa poduzeća

SAŽETAK

Ovaj završni rad detaljno opisuje i predstavlja koncepte Industrije 4.0 i Industrije 5.0. Početak rada sadrži povijesni pregled industrijskih revolucija od Industrije 1.0 pa sve do Industrije 5.0. U nastavku rada definiran je koncept Industrije 4.0 te su pobliže opisane ključne značajke i tehnologije povezane s istom. Potom su prikazani primjeri uvođenja te studije slučaja povezane sa navedenim konceptom. U daljnjem dijelu, prikazan je koncept Industrije 5.0 sa svim bitnim značajkama i studijama slučaja. Na kraju rada prikazana je usporedba dvaju koncepata sa istaknutim sličnostima i razlikama.

Ključne riječi: Industrija 4.0, Industrija 5.0, digitalizacija, optimizacija, održivost

SUMMARY

This thesis thoroughly describes and presents the concepts of Industry 4.0 and Industry 5.0. The beginning of the paper provides a historical overview of industrial revolutions from Industry 1.0 to Industry 5.0. The subsequent sections define the concept of Industry 4.0 and provide a detailed description of its key features and related technologies. Examples of implementation and case studies associated with this concept are also presented. Furthermore, the paper explores the concept of Industry 5.0, outlining its essential features and providing case studies. In the concluding part of the thesis, a comparison of the two concepts is presented, highlighting their similarities and differences.

Key words: Industry 4.0, Industry 5.0, digitalization, optimisation, sustainability

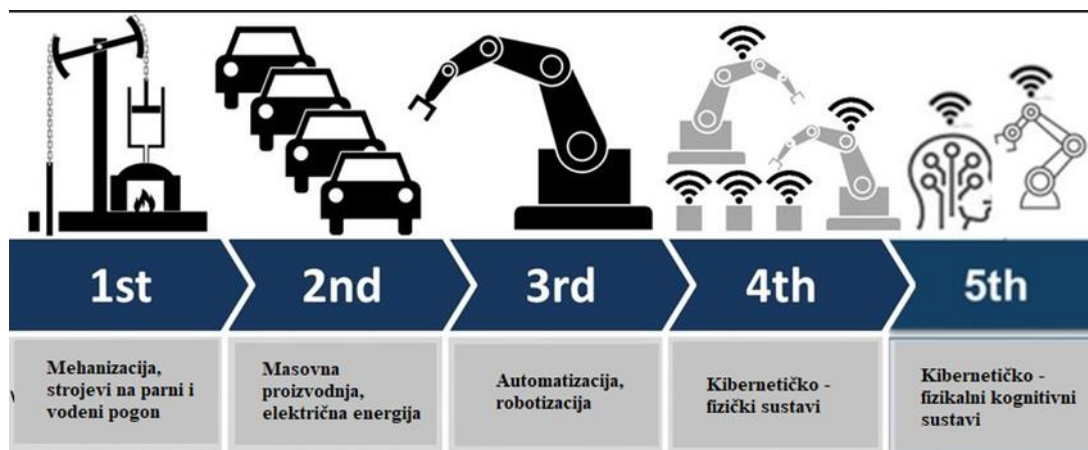
1. UVOD

Tijekom svoje povijesti čovječanstvo je prošlo kroz mnoge tehnološke evolucije. Ove evolucije mogu se promatrati kao prijelazi koji obično nastupaju postepeno. Kada dođe do značajne promjene, tada se ovi prijelazi označavaju kao revolucije. Ove revolucije mogu trajati godinama pa i desetljećima i ne podrazumijevaju nužno uništenje prethodnog stanja. Većina ovih revolucija potaknuta je razvojem novih tehnologija, novih ideja ili politika u određenom području. Tako je 2011. godine na sajmu u Hannover javnosti prvi puta predstavljen pojam Industrija 4.0. Taj pojam, iniciran od strane Njemačke, predstavlja poticaj razvoja industrije automatizacijom procesa proizvodnje korištenjem svih modernih proizvodnih sredstava nazvanih kibernetičko-fizičkim sustavima[1]. Iako je prošlo tek desetljeće od predstavljanja koncepta Industrije 4.0 već se pojavio novi koncept, Industrija 5.0. Za razliku od prijašnjih industrijskih revolucija, gdje je postojao veliki inovativni skok, Industrija 5.0 se u velikoj mjeri oslanja na Industriju 4.0 te nastavlja trend bržeg napretka koji je započela Industrija 4.0. Osim što prepoznaje potencijal industrije za stvaranje radnih mjesta i poticanja gospodarskog rasta, Industrija 5.0 prepoznaje potencijal industrije za postati održiv pružatelj prosperiteta usklađivanjem proizvodnje s ekološkim ograničenjima te stavljanjem dobrobiti zaposlenika na prvo mjesto[2].

Zadatak ovog rada je predstaviti koncept Industrije 4.0 i Industrije 5.0, pobliže ih usporediti s ciljem utvrđivanja zajedničkih značajki kao i onih koje ih razlikuju jedno od drugog, istražiti područja njihova djelovanja te prikazati studije slučaja uvođenja navedenih koncepata

2. INDUSTRIJSKE (R)EVOLUCIJE

U povijesti industrijske proizvodnje, dogodila su se četiri ključna skoka u razvoju proizvodnje, poznata i kao četiri industrijske revolucije no zadnjih godina spominje se i peta industrijska revolucija. Tehnološke inovacije poput otkrića parnog stroja, električne energije, pokretne trake, automatizacije procesa omogućile su značajan napredak u produktivnosti. Na donjoj slici prikazan je razvoj industrija kroz povijest.



Slika 1. Pregled industrijskih revolucija kroz povijest [3]

2.1. Industrija 1.0

Počevši od kraja 18. stoljeća, Industrija 1.0, bolje poznata kao 1. industrijska revolucija, predstavlja početnu industrijsku revoluciju — prvu smislenu upotrebu tehnologije i strojeva za povećanje efikasnosti u proizvodnji. Prvi znakovi Industrije 1.0 javljaju se krajem 18. stoljeća na području Velike Britanije gdje ruralna društva postaju industrijalizirana i urbana. Prije Industrije 1.0 proizvodnja se odvijala u obiteljskim domovima gdje su se koristili ručni alati. Industrijalizacija je premjestila proizvodnju iz domova u velike tvornice što je bilo ekonomski isplativije. Čimbenici koji su utjecali na razvoj revolucije bili su velika nalazišta ugljena i tadašnja utjecajna uloga države kao jedne od vodećih kolonijalnih sila na svijetu. Zbog sve veće potražnje za sirovinama i dobrima, trgovci su trebali bolje metode proizvodnje. Ključni faktor za Industriju 1.0 bio je izum parnog stroja koji se u početku koristio za ispumpavanje vode, ali kasnije nalazi svoju ulogu u pokretanju brodova, lokomotivi i strojeva u tvornicama pomoću kojih proizvodnja postaje masovna. Najveći skok desio se u industriji željeza i tekstila koje su brzo prihvatile novopridošle promjene. Nekoliko principa Industrije 1.0 se koristi i danas, a sva kasnija evolucija proizlazi iz inovacija koja su predstavljena u ovom razdoblju [1].

2.2. Industrija 2.0

Nakon Industrije 1.0, krajem 19. stoljeća uslijedila je Industrija 2.0. Izumljen je čelik, relativno jeftin materijal s odličnim fizičkim svojstvima, koji je poslužio kao zamjena za željezo. Upravo zbog toga su se počele graditi konstrukcije, strojevi, željeznice koji prije nisu bili isplativi. Također, uporaba čelika dovela je do pojeftinjenja gradnje željeznica što je uvelike doprinijelo razvoju transportnih puteva. Još jedna stavka koja je vrlo značajna za Industriju 2.0, a i bez koje je današnji život nezamisliv jest električna energija. Upravo zbog otkrića električne energije aktivnosti proizvodnje više se nisu nužno trebale odvijati tijekom dana što je doprinijelo povećanju proizvodnje. Ključna karakteristika industrije 2.0 bila je njezina dvodimenzionalnost, odnosno obuhvaćanje obujma proizvoda i njihove raznolikosti. Veliku prekretnicu u proizvodnji označilo je uvođenje pokretne trake u proizvodne procese što je učinilo radnike efikasnijima i produktivnijima. Radnik u ovom procesu nije morao poznavati cijeli proizvodni proces, već samo određenu operaciju unaprijed definiranog procesa. Kako bi se postigla univerzalnost montažnih linija s kojima se suočavalo tržište, počele su se razvijati SMED metode, koje su bile ključne za fleksibilan i učinkovit proces. Radnici su bili upoznati sa svim radnim mjestima na montažnoj liniji, što znači da je radnik mogao obavljati više od jedne operacije [3].

2.3. Industrija 3.0

Treća industrijska revolucija, poznata kao i digitalna revolucija, obuhvaća razdoblje 70-ih godina 20. stoljeća. U tom razdoblju događa se brzi razvoj elektronike i informacijskih tehnologija. Proizvodnja je sve više računalno potpomognuta te iz masovne postaje sve individualiziranija, drugim riječima postaje raznovrsnija i prilagođena pojedincima. Pojavljuju se i napredniji roboti koji postaju sve isplativiji te za sobom povlače automatizaciju proizvodnje, a automatizacija za sobom povlači smanjenje potrebe za radnicima koji zarađuju novac djelatnostima koje ne zahtijevaju stručne kvalifikacije i za koji je fizička snaga važnija od obrazovanja, tzv. plavim ovratnicima (eng. *blue collar*) [3].

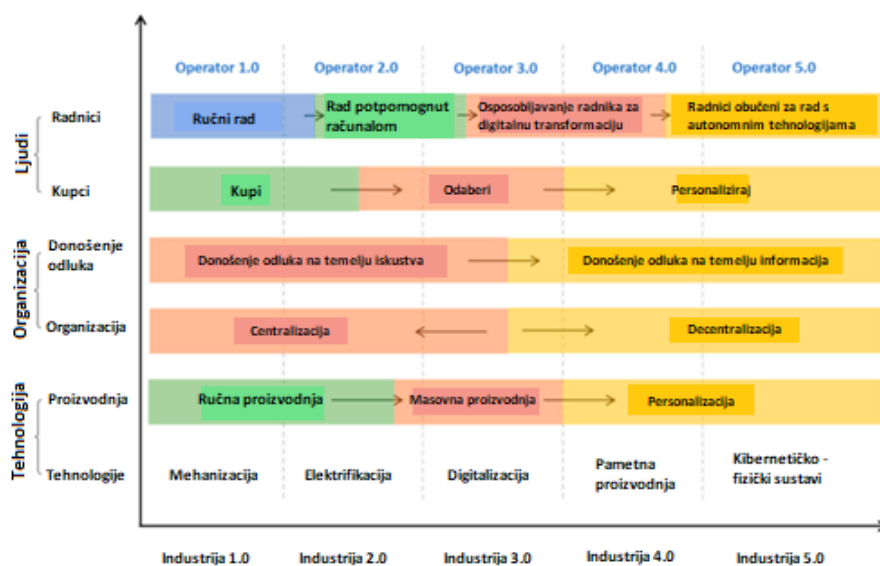
2.4. Industrija 4.0

Prvotne promjene, poput globalnih komunikacijskih mreža i međusobno povezanih pametnih senzora, omogućile su tehnologiju za oblikovanje naprednih proizvodnih procesa [4]. Industrija 4.0 je novi koncept gospodarskog razvoja i poboljšanja životnih uvjeta. Ona integrira proizvodnju, proizvode, tržište i potrošače koristeći najbolje informacijske i komunikacijske tehnologije. Glavni cilj Industrije 4.0 je ispunjavanje i prilagodba proizvoda željama kupaca,

što utječe na razne aspekte poput organizacije, razvoja, proizvodnje i recikliranja proizvoda. S obzirom da je došlo do povećanja količina proizvoda koji su morali biti individualno prilagođeni svakom kupcu, uveden je koncept masovne prilagodbe. Upravo zbog tih trendova došlo je do značajnog skoka u procesu proizvodnje, koji zahtijeva veću proizvodnost, kvalitetu proizvoda i zadovoljstvo kupca.

2.5. Industrija 5.0

Industrija 5.0 predstavlja koncept nove faze u razvoju industrijskih sustava i nastavlja trend bržeg napretka koji je započela Industrija 4.0. Umjesto velikog iskoraka u razvoju, kao što je vidljivo u prethodnim skokovima između industrija, Industrija 5.0 se u velikoj mjeri oslanja na Industriju 4.0. Dok se Industrija 4.0 fokusira na potpunu automatizaciju i povezanost strojeva, Industrija 5.0 stavlja naglasak na ponovnu integraciju ljudi u proizvodne procese. Ovaj koncept naglašava važnost suradnje između ljudi, strojeva i računalnih sustava kako bi se postigla najveća učinkovitost i fleksibilnost [5]. Osim suradnje između strojeva i čovjeka, Industrija 5.0 se temelji na principima održivosti i otpornosti.



Slika 2. Transformacije revolucija prema važnim sudionicima i segmentima industrije [5]

Na slici 2 prikazano je kako su se kroz industrijske revolucije mijenjali trendovi u važnim aspektima industrije, a tu se ponajprije misli na tehnologiju proizvodnje, organizaciju proizvodnje i ljude koji su uključeni u proces proizvodnje. Promatrajući Sliku 2. zamjećuje se kako su se najveće promjene dogodile pri prijelazu iz Industrije 3.0 u Industriju 4.0, odnosno proizvodnja je sa masovne prešla na personaliziranu, odluke se više ne donose na temelju

iskustva već na temelju informacija te su radnici obučavani za digitalnu transformaciju. To znači da su opremljeni potrebnim vještinama, znanjem i sposobnostima kako bi se što bolje prilagodili i uspješno djelovali u digitalnom okruženju unutar radnog mjesta.

3. INDUSTRIJA 4.0

2011. godine kada je javnosti prvi puta predstavljen koncept Industrije 4.0 od strane njemačkog gospodarstva, Industrija 4.0 izazvala je ogroman interes diljem svijeta što se može vidjeti u nastanku brojnih znanstvenih radova na tu temu. Iako je koncept obznanjen javnosti već dugi niz godina, još uvijek se znanstvenici ne mogu usuglasiti oko definicije Industrije 4.0 koja bi svima bila zadovoljavajuća. Jedan od prvih znanstvenih radova na temu Industrije 4.0 [6] smatra da je koncept Industrije 4.0 predstavljen s ciljem autonomije strojeva, a time i autonomije samog procesa. U [7] Industrija 4.0 smatra se novom vizijom proizvodnog okruženja bez ljudi, sastavljenog od proizvođača, inteligencije, komunikacije između strojeva i umrežavanja. Još jedan odličan pogled na Industriju 4.0 daje [8] koji tvrdi da će roboti postati dominantniji u proizvodnji, da će autonomni sustav donositi više samostalnih odluka, procesi će biti više koordinirani te da će se problemi rješavati bez ljudske intervencije. Takva pametna proizvodnja trebala bi poboljšati učinkovitost prikupljanja i analize podataka, učiniti sustave i procese dosljednijima, snažnijima i agilnijima, te stoga donijeti učinkovitije poslovne modele.

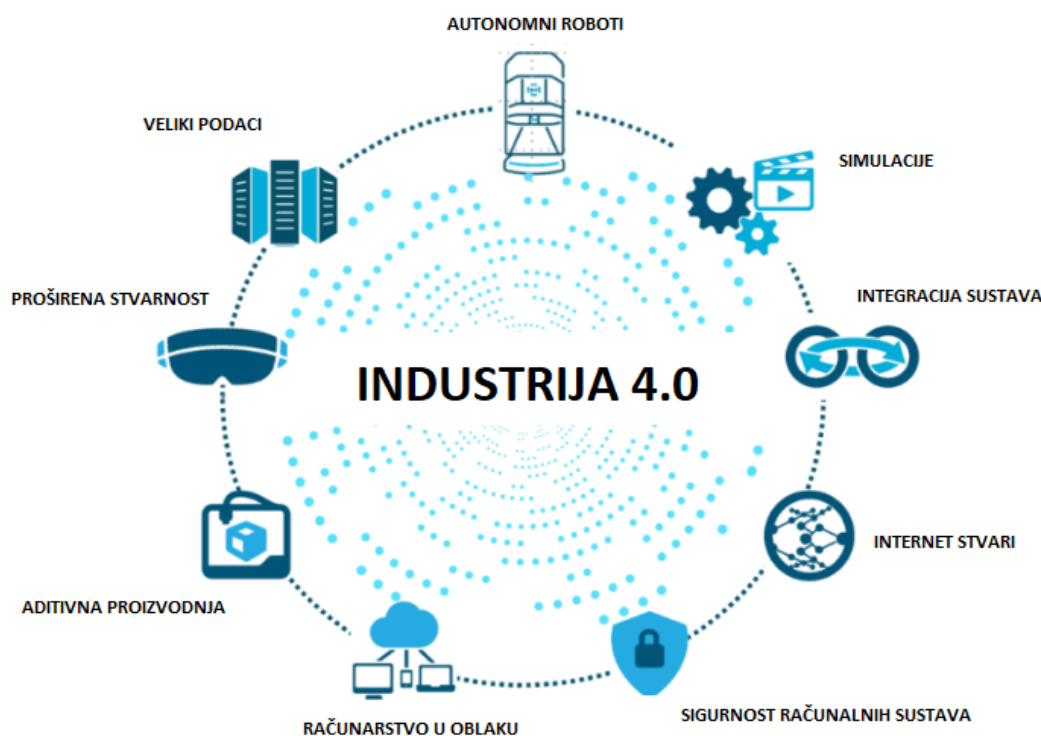
Doduše, za razliku od ranije navedenih pogleda na Industriju 4.0 koji isključuju čovjeka iz proizvodnih procesa, postoje i oni koji smatraju kako je čovjek i dalje bitan dio procesa. Tako je u [9] predložen model „Industrial Internet Pyramid“ kao nastajućí model proizvodnje usmjeren prema čovjeku u kojemu zaposlenici imaju glavnu ulogu. Nadalje, u [10] primijećeno je da u dinamičnim radnim okruženjima industrije 4.0 zaposlenici moraju biti fleksibilni te da moraju biti sposobni na prilagodbu u kojoj god se situaciji našli.

S obzirom na ranije spomenute percepcije i tumačenja Industrije 4.0, može se zaključiti da je polazišna ideja Industrije 4.0 zamisao da svi objekti u tvornici (strojevi, roboti, uređaji, proizvodi) međusobno komuniciraju i razmjenjuju informacije. Jedan od ciljeva ove industrije jest visoko – fleksibilna, individualizirana, masovna proizvodnja s malo škarta gdje kupac dobiva proizvod skrojen po njegovoj mjeri za relativno nisku cijenu. Što se tiče proizvodnog procesa, naglasak je na transformaciji proizvodnih procesa pomoću samoučenih i automatiziranih strojeva kako bi se poboljšala učinkovitost proizvodnje. To uključuje praćenje podataka u stvarnom vremenu u proizvodnim procesima i praćenje statusa i položaja proizvoda kroz cijeli proizvodni ciklus, rezultirajući potpunom kontrolom nad proizvodnim procesom. Najbitnija stavka je ta da proizvodni proces bude fleksibilan, da je u stanju proizvesti što više različitih tipova proizvoda te je u stanju napraviti promjenu na proizvodu uslijed promjene želje kupca. Od inženjera se očekuje da budu uključeni u cijeli životni vijek proizvoda od početne ideje do kraja životnog vijeka proizvoda. Tijekom životnog vijeka, proizvod koji je rezultat

Industrije 4.0 bit će u stanju slati velik broj podataka svome proizvođaču te će na temelju tih podataka proizvođač znati koja poboljšanja su potrebna u budućnosti.

3.1. Pojmovi povezani sa Industrijom 4.0

Industrija 4.0 obuhvaća niz pojmova i tehnologija koji su od ključne važnosti za njeno razumijevanje i za njen razvitak poput: Interneta stvari (*eng. Internet of Things - IoT*), Kibernetiko – fizički sustavi (*eng. Cyber – physical systems*) Veliki podaci (*eng. Big Data*), pametna tvornica (*eng. Smart factory*), računalni oblak (*eng. Cloud computing*), aditivna proizvodnja, proširena stvarnost itd. [11].



Slika 3. Pojmovi povezani s Industrijom 4.0 [11]

Internet stvari (*eng. Internet of Things*)

Internet postaje sve dostupniji, cijena njegovog korištenja opada, sve je više uređaja u stanju bežično se spojiti na Internet, u njih se ugrađuje mnoštvo senzora, a pametni mobiteli su postali sastavni dio čovjekovog života. Sve ove stvari tvore preduvjete za pojavu Interneta stvari.

Internet stvari je globalna mreža međusobno povezanih objekata koji se oslanjaju na standardne komunikacijske protokole [12]. Ova definicija sugerira prisutnost mreže i povezanih hardverskih elemenata koji surađuju za zajednički cilj. Povezani objekti generiraju velike količine podatkovnih nizova koje je potrebno procijeniti u stvarnom vremenu, što je važan

faktor za Industriju 4.0. Mrežni sustav je postavljen tako da prikuplja podatke u stvarnom vremenu putem senzora. Analizom i razumijevanjem procesa u stvarnom vremenu omogućuje se brža optimizacija proizvodnog procesa i donošenje odluka na temelju obrađenih podataka.

Internet stvari igra značajnu ulogu u transformaciji tradicionalnih tvornica u pametne tvornice koristeći mrežu međusobno povezanih uređaja, senzora i softvera za praćenje i optimizaciju proizvodnog procesa (Slika 4). Prediktivno održavanje pomoću interneta stvari u pametnim tvornicama može se koristiti i za sprječavanje kvarova strojeva, smanjenje vremena neaktivnosti i produljenje životnog vijeka opreme [12]. Proizvođači mogu dobivati uvid u uzorke potrošnje energije tijekom proizvodnje dijelova koristeći senzore u pametnim tvornicama [12]. Također, internet stvari može pružiti sveobuhvatan pogled na okolinu tvornice kako bi poboljšao sigurnost radnog mjesta prepoznajući potencijalne opasnosti i upozoravajući radnike na moguće opasnosti. Dobavljači mogu koristiti praćenje putem uređaja interneta stvari kako bi nadgledali pošiljke i pružili ažuriranja u stvarnom vremenu o vremenima isporuke i lokacijama kako bi analizirali i optimizirali lanac opskrbe u pametnim tvornicama. Osim toga, internet stvari je moćna tehnologija koja može optimizirati upravljanje inventarom u pametnim tvornicama radi smanjenja troškova, poboljšanja učinkovitosti i pružanja stvarnog uvida u razine inventara i kretanja [12].



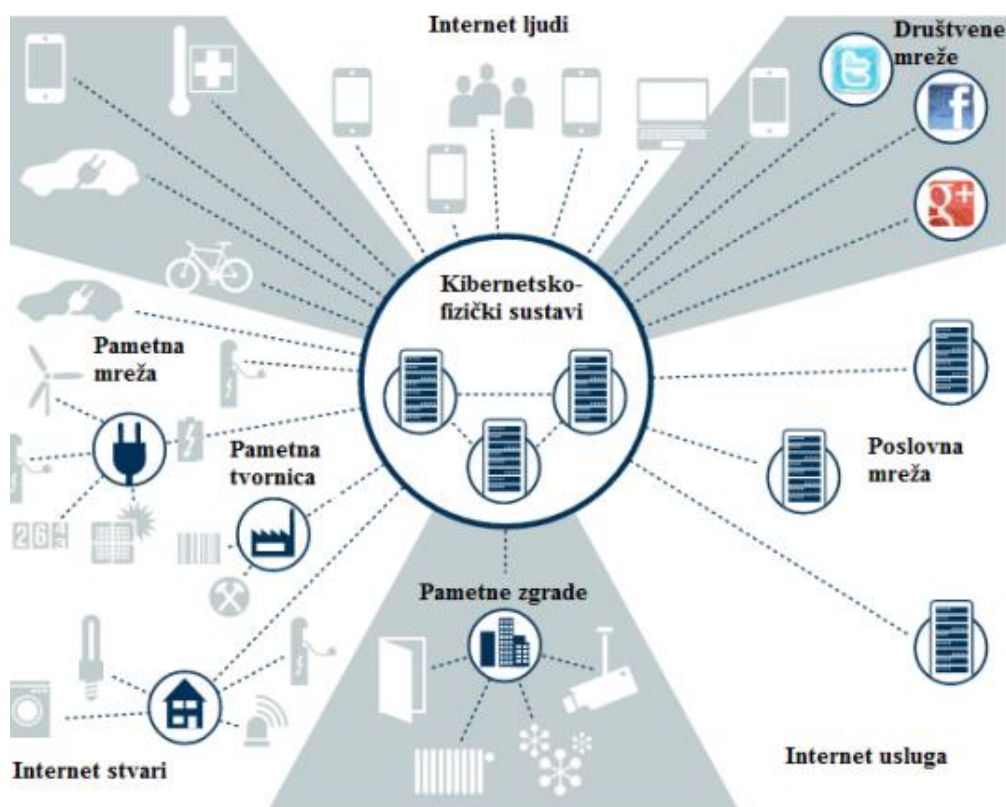
Slika 4. Primjeri primjene Interneta stvari u proizvodnji [13]

Kibernetско – fizički sustavi (eng. Cyber – physical systems)

Kibernetско – fizički sustavi su integrirani sustavi koji objedinjuju računalne, komunikacijske i fizičke komponente kako bi omogućili pametnu i autonomnu kontrolu u stvarnom vremenu. Implementacija kibernetско – fizičkih sustava biti će presudna za efikasan razvoj i rad autonomnih, samoupravljivi proizvodnih sustava temeljenih na znanju i sensorima [14]. Industrija 4.0 zasnovana je na uspješnom funkcioniranju ovog sustava. Računala preko mreže nadgledaju i kontroliraju fizičke procese koji onda preko povratnih petlji šalju podatke i utječu na računala i njihove proračune. Sve je povezano pomoću interneta s njegovim korisnicima (Slika 5). Novi sustav mijenja odnos između čovjeka i upravljivih sustava. Svi uređaji, strojevi, materijali su opremljeni sensorima i međusobno povezani komunikacijskim tehnologijama.

Mogućnosti kibernetско – fizičkih sustava [6]:

1. Nadgledanje i upravljanje fizičkim i organizacijskim procesima u stvarnom vremenu
2. Interakcija sa korisnicima
3. Prilagodba na promjene u okolini
4. Samoproučavanje i samooptimizacija.



Slika 5. Kibernetско - fizički sustav [6]

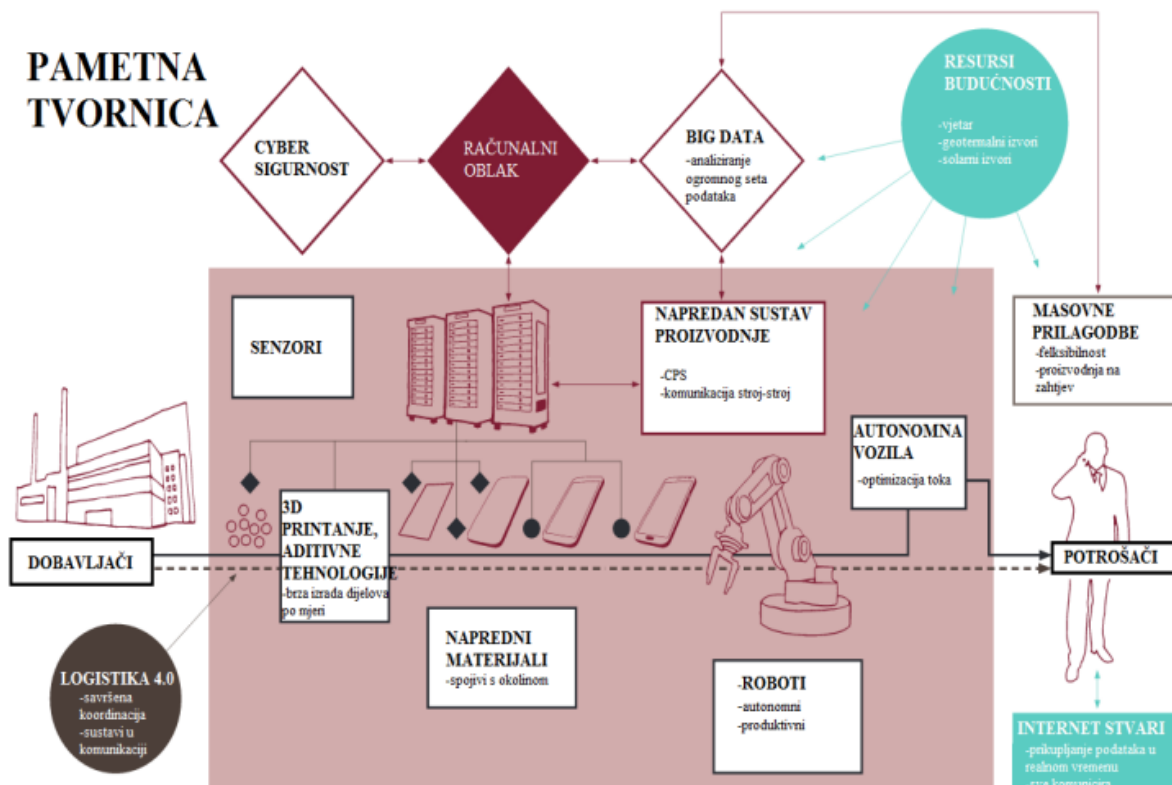
Pametna tvornica (eng. Smart factory)

Pametne tvornice jedan su od ključnih čimbenika na kojemu se temelji Industrija 4.0. Pametna tvornica je kompleks koji koristi digitalne tehnologije, poput već ranije spomenutog Interneta stvari, ali i nekih drugih tehnologija poput umjetne inteligencije i robota, sve sa svrhom poboljšanja efikasnosti i produktivnost operacija [15]. U pametnim tvornicama (Slika 6), oprema i strojevi su međusobno povezani te imaju mogućnost komunikacije jedno s drugim kao i sa centralnim kontrolnim sustavom kako bi se vršila kontrola i nadzor nad sustavom u stvarnome vremenu. Ovo omogućuje radnicima da optimiziraju procece, smanje zagađenje okoliša i povećaju fleksibilnost kako bi bili u mogućnosti odgovoriti na promjene koje tržište zahtijeva. Najvažnija tehnologija koja omogućuje ranije navedene stvari i podiže popularnost pametnim tvornicama je Internet stvari.

Glavni produkt pametne tvornice je pametni proizvod. Pametni proizvod zna kako se treba proizvesti, pamti tu informaciju nakon proizvodnje te je u stanju informirati kupca o optimalnim parametrima za njegovu uporabu [6]. Dodana vrijednost pametnih proizvoda je da daju informacije o znakovima istrošenosti i mogućim lomovima pa kupac ima mogućnost na vrijeme prepoznati kvar.

Najbitnije karakteristike pametne tvornice su [16]:

- 1) Međusobna komunikacija
- 2) Informacije ugrađene na dijelove u proizvodnji
- 3) Samoorganizacija
- 4) Proizvođač je i pružatelj usluga
- 5) Pametni, personalizirani proizvod.



Slika 6. Primjer pametne tvornice[16]

Slika 6 prikazuje shemu pametne tvornice u kojoj se koristeći napredne tehnologije poput 3D printanja, robota, velikih podataka i sličnog pokušava proizvesti proizvod prilagođen željama potrošača te prikupljanjem podataka pomoću senzora u realnom vremenu optimizirati cijeli sustav proizvodnje s ciljem poboljšanja produktivnosti i učinkovitosti sustava.

Veliki podaci (eng. Big Data)

Analitika temeljena na velikim skupovima podataka pojavila se tek nedavno u svijetu proizvodnje gdje optimizira kvalitetu proizvodnje, štedi energiju i poboljšava usluge opreme. U kontekstu Industrije 4.0, prikupljanje i sveobuhvatna evaluacija podataka iz različitih izvora, uključujući opremu za proizvodnju i sustave, kao i sustave za upravljanje poduzećem i korisnicima, postat će standard kako bi podržali donošenje odluka u stvarnom vremenu. Količinu informacija koje proizvode Internet stvari i današnji proizvodni sustavi treba pretvoriti u operativne ideje. Zato Big Data klasificira prikupljene informacije i donosi relevantne zaključke koji pomažu poboljšati operacije tvrtki [11].

Računarstvo u oblaku (eng. Cloud computing)

Računarstvo u oblaku predstavlja model koji pruža resurse poput pohrane podataka, mrežnih resursa, softvera i analitičkih alata putem Interneta. Prije su korisnici bili zaduženi za održavanje vlastite lokalne i fizičke infrastrukture, a sada pomoću ovog modela, oni mogu

proistupiti i koristiti reurse putem internetskog preglednika ili aplikacije. U nastavku su navedeni neki od načina na koji se Cloud computing integrira u Industriju 4.0 [11]:

1. **Pametna proizvodnja** - Cloud computing omogućava pametnu proizvodnju integritetom i analizom podataka; podaci o proizvodnji i informacije o stanju opreme mogu se prikupljati, pohranjivati i analizirati u oblaku kako bi se izvršila optimizacija proizvodnih procesa
2. **Povezanost na razini tvornice** – Cloud computing omogućava povezanost razliitih dijelova proizvodnog okruženja poput senzora, strojeva i uređaja, a podaci koje prikupljaju senzori na uređajima i strojevima se mogu dijeliti i analizirati u stvarnome vremenu putem Cloud platformi
3. **Razvoj i implementacija aplikacija** – Cloud computing pruža platforme putem kojih je moguć razvoj i implementacija aplikacija koje mogu obuhvaćati različite funkcije poput upravljanja zaliha, praćenja stanja opreme, planiranja proizvodnje
4. **Fleksibilnost i skalabilnost** – Cloud computing omogućava tvrtkama da prilagode računalne resurse prema potrebama što je vrlo važno u Industriji 4.0 gdje su promjene učestale, a potreba za fleksibilnošću je visoka
5. **Sigurnost i zaštita podataka** – jedna od najvažnijih značajki u industriji gdje podaci o proizvodnji, organizaciji i drugim aspektima zahtijevaju visoku razinu zaštite.

Aditivna proizvodnja (eng. Additive manufacturing)

Integracijom aditivne proizvodnje u Industriji 4.0 pridonosi se stvaranju fleksibilnijeg i efikasnijeg proizvodnog okruženja. Ova tehnologija igra ključnu ulogu u ostvarivanju ciljeva Industrije 4.0 poput personalizacije, optimizacije i brze prilagodbe na promjene na tržištu. U nastavku su navedeni neki od načina na koje aditivna proizvodnja doprinosi Industriji 4.0 [11]:

1. **Personalizacija proizvoda** – u industriji 4.0 naglasak je na proizvodnji kupcu prilagođenih proizvoda, a upravo aditivna proizvodnja, tj. 3D printanje pruža efikasno rješenje tom problemu
2. **Fleksibilna i brza proizvodnja prototipova** – u usporedbi sa tradicionalnim metodama proizvodnje, 3D printanje omogućava bržu izradu prototipova i proizvodnju
3. **Smanjenje troškova zaliha** – aditivna proizvodnja doprinosi smanjenju potrebe za velikim zalihama gotovih proizvoda zbog činjenice da se proizvodi mogu izrađivati prema potrebi

4. **Inovacije u materijalima** – razvojem novih materijala, koji posjeduju posebna svojstva prilagođena potrebama specifičnih aplikacija, za 3D printanje otvaraju se vrata inovacijama u proizvodnji.

Proširena stvarnost (eng. Augmented reality)

Proširena stvarnost je još jedna od tehnologija koja ima važnu ulogu u konceptu Industrije 4.0, doprinoseći obuci radne snage, praćenju performansi sustava, održavanju itd. Načini na koje se proširena stvarnost implementira u Industriju 4.0 [11]:

1. **Obuka i simulacije** – pružajući im interaktivne simulacije i vodiče, radnici korištenjem proširene stvarnosti mogu brzo usvojiti potrebna znanja i vještine koja su im nužna za obavljanje radnih aktivnosti što smanjuje potrebnu za dugotrajnom obukom
2. **Servis i održavanje** – radnici korištenjem uređaja proširene stvarnosti dobivaju informacije o statusu opreme, dijagnozi kvarova te upute o otklonu istih ili zamijeni komponenata.
3. **Povećanje učinkovitosti proizvodnje** – proširena stvarnost se implementira u proizvodne procese kako bi se povećala učinkovitost i smanjilo vrijeme postavljanja strojeva; operateri mogu koristiti proširenu stvarnost kako bi pratili korake u proizvodnji, otkrili pogreške i optimizirali procese
4. **Navigacija i praćenje inventara** – u skladišnim sustavima korištenje pametnih naočala, koje rade na principu proširene stvarnosti, može biti od koristi pri navigaciji kroz skladište ili za pronalaženje određenih stavki; nadalje, skeniranje proizvoda automatski ažurira bazu podataka što omogućuje praćenje zaliha u stvarnom vremenu.

Tablica 1. Primjeri uvođenja ranije navedenih tehnologija te njihov utjecaj na produktivnost proizvodnog procesa [17]

TEHNOLOGIJA 4.0	PRIMJER
Internet stvari	1) Identifikacija proizvoda u proizvodnom procesu putem identifikacijskih kodova koji su dodijeljeni svakom proizvodu i koji se dijele radio frekvencijom. Kodovi dolaze do centralne radne stanice koja je programirana tako da zna koje korake je potrebno provesti za pojedini proizvod, a ako dođe do greške radna stanica će pravovremeno reagirati

Aditivna proizvodnja	<ol style="list-style-type: none"> 1) Zrakoplovne tvrtke koriste aditivnu proizvodnju za primjenu novog dizajna koji smanjuje težinu aviona i time automatski smanjuje troškove sirovina 2) Medicinski implatati – izrada proteza na temelju skeniranja anatomije pacijenta
Proširena stvarnost	<ol style="list-style-type: none"> 1) Siemens je razvio virtualni model za obuku operatera postrojenja koji rade u Cosmos sustavu, a taj se model temelji na realnom, 3D prikazu okruženja koji je operaterima vidljiv kroz posebne naočale proširene stvarnosti, a putem kojega su opisane situacije u kojima se mogu naći [17] 2) John Deer, proizvođač traktora, koristi proširenu stvarnost kako bi kupcima dao mogućnost testiranja i povratnih informacije tako da se dizaj može prilagoditi kupcu. Korištenje proširene stvarnosti rezultiralo je skraćanjem ciklusa dizajna sa 27 na 9 mjeseci te smanjilo troškove za više od \$100,000[18]
Veliki podaci i analitika	<ol style="list-style-type: none"> 1) Deutsche Bahn AG je u svoju mrežu željeznica ugradio niz senzora koji prikupljaju informacije o narudžbama i kupnjama kupaca, te podatke o prometu i kapacitetu vlakova do kojih se dolazi u stvarnome vremenu, kako bi kreirali cjenovne modele koji su prilagođeni klijentovim potrebama i stanju u prometu[18] 2) Uber koristi podatke svojih vozača i korisnika kako bi razvio algoritam koji diktira cijene vožnje, npr. povećanje cijene u slučaju povećane potražnje[18]

3.2. Značajke Industrije 4.0

U nastavku su opisane glavne značajke Industrije 4.0 poput fleksibilnosti, umreženosti, horizontalne i vertikalne integracije, produktivnosti i brzog odaziva na promjenu [19].

1) Fleksibilnost

U današnjem svijetu kupci žele jedinstven proizvod prilagođen njima i njihovim potrebama. Ako proizvođač nije spreman na takve uvjete, rezultat mogu biti neočekivanim troškovima, povećanje utrošenih sati rada, potreba za više radne snage itd. Stoga, Industrija 4.0 taj cijeli

proces namještanja proizvodnih parametara prema kupčevim željama želi preseliti u virtualni svijet. Svi se procesi prije dolaska u proizvodnju simuliraju i kontroliraju te nakon slijedi prava proizvodnja.

Osim u proizvodnji, fleksibilnost će doći do izražaja u radnom vremenu. Radnici neće više morati biti prisutni na stalnim radnim mjestima već će posao moći obavljati i kontrolirati sa raznih lokacija. To će doprinijeti zapošljavanju najboljih radnika s obzirom da lokacija obavljanja posla više neće biti faktor pri odabiru posla.

2) Produktivnost

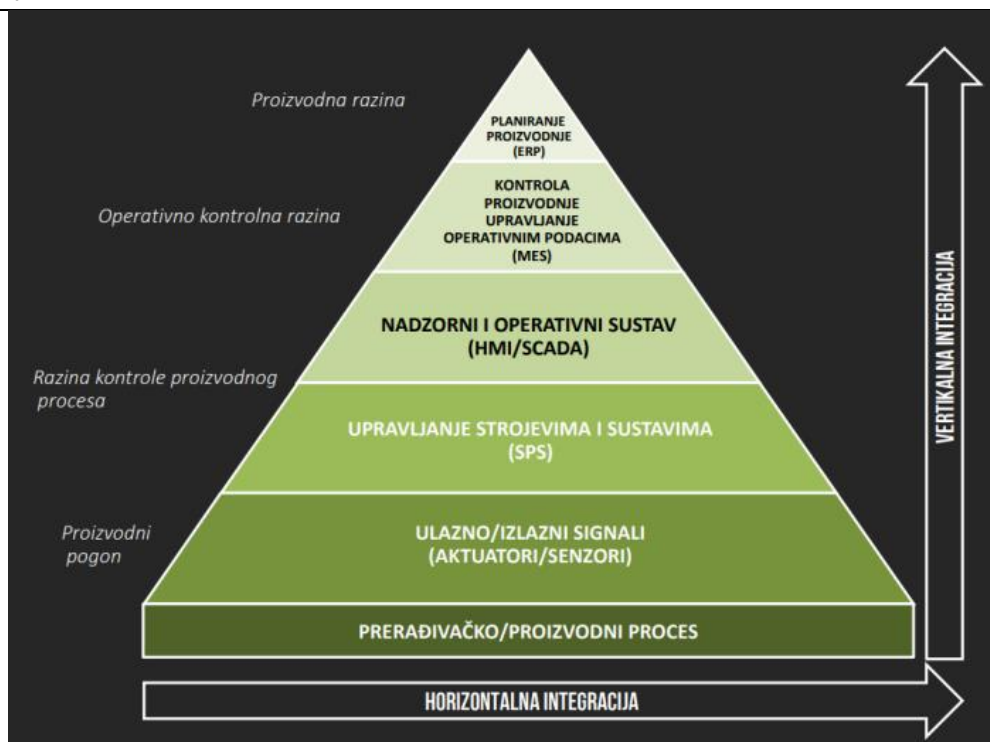
Produktivnost je jedan od ključnih pokazatelja kada su u pitanju proizvodni procesi. Za razliku od prijašnjih industrija gdje se težilo proizvodnji što više proizvoda kako bi se ostvario što veći profit, u Industriji 4.0 moguće je proizvoditi manju količinu proizvoda, a da se profit ne izgubi. Za to su zaslužni kibernetičko – fizički sustavi koji provode kontinuiranu optimizaciju proizvodnje tako što pronalaze načine da se proizvede što više proizvoda sa što manje resursa. Prema istraživanju koje je provela Boston Consulting Group, implementacijom koncepta Industrije 4.0 očekuje se povećanje produktivnosti u iznosu od 5 do 8% ponajviše u automobilskoj industriji [19]

3) Horizontalna i vertikalna integracija

Horizontalna integracija odnosi se na povezivanje različitih dijelova proizvodnog procesa unutar iste razine. To znači integraciju različitih funkcionalnih jedinica ili sustava na istoj razini. Primjerice, kod proizvodnog procesa dijelovi poput logistike, upravljanja zalihama i proizvodnje mogu biti horizontalno integrirani s ciljem poboljšanja koordinacije i komunikacije među njima.

Vertikalna integracija odnosi se na povezivanje različitih razina proizvodnje. To uključuje integraciju od gornje razine (npr. planiranje proizvodnje) do donje razine (npr. sami proizvodni proces). Omogućen je protok informacija između različitih razina čime se omogućava praćenje u stvarnom vremenu, optimizacija procesa i prilagodba promjenama.

Horizontalna i vertikalna integracija doprinose povećanju učinkovitosti procesa, smanjenju troškova i brzim prilagodbama na promjene (slika 7). Kombinacijom oba oblika integracije u Industriji 4.0 doprinosi se stvaranju agilnih, povezanih i visoko prilagodljivih proizvodnih sustava [20].



Slika 7. Primjer horizontalne i vertikalne integracije [20]

Slika 7 prikazuje primjer horizontalne i vertikalne integracije u jednom proizvodnom sustavu. Horizontalnom integracijom se povezuju sustavi koji se nalaze na istoj razini s ciljem bolje komunikacija i koordinacije. Vertikalnom integracijom se povezuju sustavi na različitim razinama kako bi bilo moguće praćenje podataka u realnom vremenu te optimizacija procesa i prilagodba promjenama.

4) Brz odaziv na promjenu

Rezultat uvođenja koncepta Industrije 4.0 jest brže i bolje donošenje odluka. Međusobno povezani uređaji generiraju podatke koji prolaze kroz softversku obradu dajući informacije na temelju kojih stručnjaci donose pravovremene odluke. Odluke se sve češće donose na temelju znanja i iskustva, a ne na temelju metode pokušaja i pogrešaka. Bolje odluke rezultiraju s manje škarta i pogrešaka. Temeljem ovakvog sustava menadžeri će imati uvid u stanje u proizvodnji, ali će se suočiti s raznim izazovima: koje podatke prikupljati, kako najbolje iskoristiti dobivenu informaciju, koja je najbolja odluka za donijeti [19].

5) Umreženost

U Industriji 4.0 digitalni i stvarni svijet su povezani. Informacije se putem interneta konstantno dijele između strojeva i ljudi. Proizvodnja s međusobno umreženim strojevima postaje skladna, u svakom trenutku stroj dobiva informacije o operacijama koje se odvijaju na drugim strojevima, vremenu kada sljedeći dio treba stići do njega i slično. Umreženost ne mora nužno

biti vezana samo za jedno poduzeće, već dva ili više poduzeća mogu biti međusobno umrežena tako da proizvodni procesi budu optimizirani i usklađeni kad je u pitanju datum isporuke [19].

3.3. Prednosti Industrije 4.0

Prednosti Industrije 4.0 su mnogobrojne, a u nastavku su istaknute neke od važnijih.

1) Poboljšana sigurnost i kvaliteta proizvoda

Sigurnost proizvoda igra važnu ulogu kako u proizvodnji tako i u maloprodajnom sektoru. Postoji spremnost kupaca da plate više za sigurne i visokokvalitetne proizvode. U životnom vijeku proizvoda, dionici potrošačkih proizvoda poput proizvođača, laboratorija za testiranje, maloprodajnih trgovaca iz lanca opskrbe preuzimaju neizbježnu odgovornost za osiguranje sigurnosti proizvoda tijekom cijelog životnog ciklusa proizvoda [22]. Korištenje podataka o sigurnosti proizvoda poput podataka o povlačenju proizvoda, poboljšanih sustava upravljanja kvalitetom, samoregulacije i automatskog praćenja unaprijed definiranih kvalitativnih karakteristika putem implementacije vertikalne i horizontalne integracije u Industriji 4.0 smanjit će sigurnosne i kvalitativne probleme [23]. Umjetna inteligencija bit će primijenjena na testiranje kvalitete u različitim fazama proizvodnog procesa, kako bi se pratila i testirala kvaliteta proizvoda. Stoga će implementacija Industrije 4.0 rezultirati poboljšanom sigurnošću i kvalitetom proizvoda.

2) Inovativnost u proizvodnji

Razvoj inovativnih tehnologija povezanih putem interneta stvari, umjetne inteligencije i pametne proizvodnje generira novi val inovacija u proizvodnji [24]. Oprema koja komunicira s drugim strojevima i korisnicima u procesu samoregulacije i automatizacije, uz nisku razinu ljudske intervencije, dinamičku komunikaciju i kontrolu između proizvodnih prostora i tržišta, stvara novi proizvodni svijet. Pametna tvornica će biti povezani i fleksibilni proizvodni sustavi koji koriste velike količine podataka iz proizvodnje i operacija do potražnje na tržištu kako bi stvorili revoluciju u proizvodnji s ogromnom konkurentskom prednošću u usporedbi s tradicionalnim proizvođačima [24]. Proizvodne linije Industrije 4.0 bit će projektirane kako bi se prilagodile proizvodnji velike raznolikosti i niskog volumena, što je izazov za tradicionalne proizvodne procese.

3) Društveni i ekonomski benefiti

Implementacija Industrije 4.0 utjecat će na smanjenje emisije stakleničkih plinova. Uzrok tome jest vertikalna integracija podataka o praćenju ugljičnog otiska koji će se strogo nadzirati

korištenjem algoritma koji će kontrolirati razne parametre [25]. Nadalje, učinkovitost resursa će se poboljšati, čime će se smanjiti otpad i povećati energetska učinkovitost.

Što se tiče društvenih benefita, upravljanje i odluke će biti transparentne i temeljene na podacima. Fizički zahtjevan posao ili ergonomski neugodno pozicije obavljat će roboti, a pametni, samoregulirajući proizvodni procesi brinut će o monotonim poslovima u proizvodnom procesu time poboljšavajući kvalitetu radnog života ljudi.

4) Organizacijska agilnost

Agilnost organizacije je sposobnost organizacije da se nosi sa neizvjesnostima na tržištu i koristi brzi odgovor kako bi tu priliku pretvorila u inovativne proizvode i usluge [26]. Dva ključna aspekta organizacijske agilnosti su brzina i inovativnost. Pod brzinom se podrazumijeva pravovremeno reagiranje, a inovativnost označava kvalitetu odgovora. Pametna mreža proizvodnih ćelija, proizvodnih linija i drugih aspekata proizvodnje i prodaje proizvoda unutar organizacije, kao što su marketing i prodaja, pomoći će brzom odgovoru na zahtjeve kupaca. To će također omogućiti proizvodnju inovativnih i prilagođenih proizvoda kako bi se zadovoljile potrebe kupaca. Agilnost organizacije rezultirat će dugoročnim uspjehom organizacije.

3.4. Nedostatci Industrije 4.0

Osim prednosti, Industrija 4.0 posjeduje u neke nedostatke koji su detaljnije opisani u nastavku teksta.

1) Socio tehničke implikacije Industrije 4.0

Industrija 4.0 je socio tehnički sustav te je za uspješnu i održivu implementaciju Industrije 4.0 poželjna zajednička optimizacija socio tehničkih sustava [27]. Stoga bi tijekom implementacije integracijske arhitekture Industrije 4.0 teoriju socio tehničkih sustava trebalo uključiti u svaku fazu integracije. Sudeći prema znanstvenim člancima koji se bave ovom tematikom, ako se teorija socio tehničkih sustava ne uključi u svaku fazu može doći do određenih socijalnih komplikacija poput [27]:

- Polarizacija radnih mjesta, a s time i razlika u plaćama
- Nezaposlenost na temelju nedostatka kvalificirane radne snage
- Populacija lišena plaćenog rada
- Porast nesigurnosti u društvu
- Demografske promjene koje koriste starijima ili mlađima.

2) Cyber sigurnost

Transparenstnost informacija i digitalno otvaranje kibernetско – fizičkih sustava izlažu ih nizu kibernetičkih sigurnosnih problema poput manipulacije procesima, isključenja putem kibernetičkih napada, zaštite podataka, zaštite proizvoda i zaštite drugih osjetljivih podataka [28]. Kibernetička sigurnost bit će imperativ, a nedostatak odgovarajuće strategije može poremetiti poslovno funkcioniranje od strane neprijateljskih elemenata. Stoga su nužne čvrste mjere za uspješnu provedbu inicijativa Industrije 4.0.

3) Potreba za potpunom implementacijom Industrije 4.0

Potpuna implementacija Industrije 4.0 nužna je za uspjeh ove inicijative što može biti izazovno jer implementacija Industrije 4.0 mora biti dizajnirana za različite proizvodne strukture ili veličine tvrtki [28]. Alokacija financijskih resursa predstavlja izazov, pa stoga neke organizacije zbog financijskih problema usvajaju prilagodbu već postojećih proizvodnih i logističkih sustava [29]. Industrija 4.0 ne bi trebala biti implementirana izolirano jer neće donijeti održive rezultate. Koordinacija s postojećom opremom i procesima proizvodnje rezultirat će kompliciranim procesima i troškovima, što će biti vrlo teško za organizacije poput malih i srednjih poduzeća. Istraživanje u Njemačkoj prikazalo je da kompleksnost integracije Industrije 4.0 u postojeće organizacijske hijerarhije i strukture, kao i u proizvodne i logističke sustave, odnosno prilagodbu, sprječava tvrtke da slijede nove proizvodne paradigme [30]. Kao zaključak svega rečenog za uspjeh Industrije 4.0, potrebna je potpuna implementacija Industrije 4.0.

4) Visoka početna ulaganja

Da bi se osmislila i implementirala struktura prilagođena poslovnim potrebama, potrebno je značajna početna investicija u pogledu troškova i vremena. Troškovi kapitalnih rashoda su značajni pa novac mora biti osiguran za provedbu Industrije 4.0. Kroz duže vrijeme početna ulaganja će se isplatiti rezultirajući profitabilnošću, međutim početni troškovi potrebni za implementaciju su visoki. Visok početni trošak također je povezan s visoko kvalificiranom radnom snagom. To je zato što je sve sklono automatizaciji što za sobom povlači poslove razvoja softverskih alata za rad. Kao primjer, postavljanje opreme za aditivnu proizvodnju, što se smatra jednim od omogućitelja Industrije 4.0, vrlo je skupo. Međutim, razvoj radnog okruženja i potreba za visoko kvalificiranim developerima, iako je početno skupo, potrebno je samo na početku. Nakon toga, tijekom operacija u dugom roku, potrebni su samo nekoliko operatora s manje visokim kvalifikacijama [28].

3.5. SWOT analiza Industrije 4.0

Nakon što su u poglavljima 3.3. i 3.4. definirane prednosti i nedostaci Industrije 4.0, moguće je na provesti SWOT analizu kako bi se jasnije dočarale snage, slabosti, prilike i prijetnje Industrije 4.0.

Tablica 2. SWOT analiza Industrije 4.0 koju je provela Europska unija [19]

SNAGE	SLABOSTI
<ul style="list-style-type: none"> • povećanje produktivnosti, učinkovitosti, kompetitivnosti, prihoda • poboljšanje zadovoljstva kupaca • fleksibilna proizvodnja i kontrola kvalitete 	<ul style="list-style-type: none"> • ovisnost o otpornosti tehnologija i mreža: male smetnje mogu imati velik utjecaj • troškovi razvoja i implementacije • potreba za visokokvalificiranom radnom snagom • potencijalni gubitak kontrole nad poduzećem • nezaposlenost nedovoljno obučene radne snage
PRILIKE	PRIJETNJE
<ul style="list-style-type: none"> • razvitak novog vodećeg tržišta za proizvode i usluge • smanjiti ulazne barijere za neka mala i srednja poduzeća kako bi sudjelovala na novim tržištima i povezala se s novim lancima opskrbe • suprotstaviti se negativnim demografskim trendovima u EU 	<ul style="list-style-type: none"> • ranjivost i nestabilnost globalnih lanaca vrijednosti • radnici, mala i srednja poduzeća, industrije i nacionalna gospodarstva kojima nedostaje sredstava i/ili svijesti za prilagodbu Industriji 4.0 • Cyber sigurnost, intelektualno vlasništvo, privatnost podataka

Na temelju rezultata SWOT analize prikazanih u tablici 2 može se zaključiti kako su glavne snage Industrije 4.0 povećanje produktivnosti i učinkovitosti te fleksibilna proizvodnja i kontrola kvalitete proizvoda, a sve navedeno daje priliku malim i srednjim poduzećima da se probiju na nova tržišta i povežu s novim lancima opskrbe. Svakako treba imati na umu i slabosti poput ovisnosti o tehnologiji, veliki investicijski troškovima i potreba za visokokvalificiranom

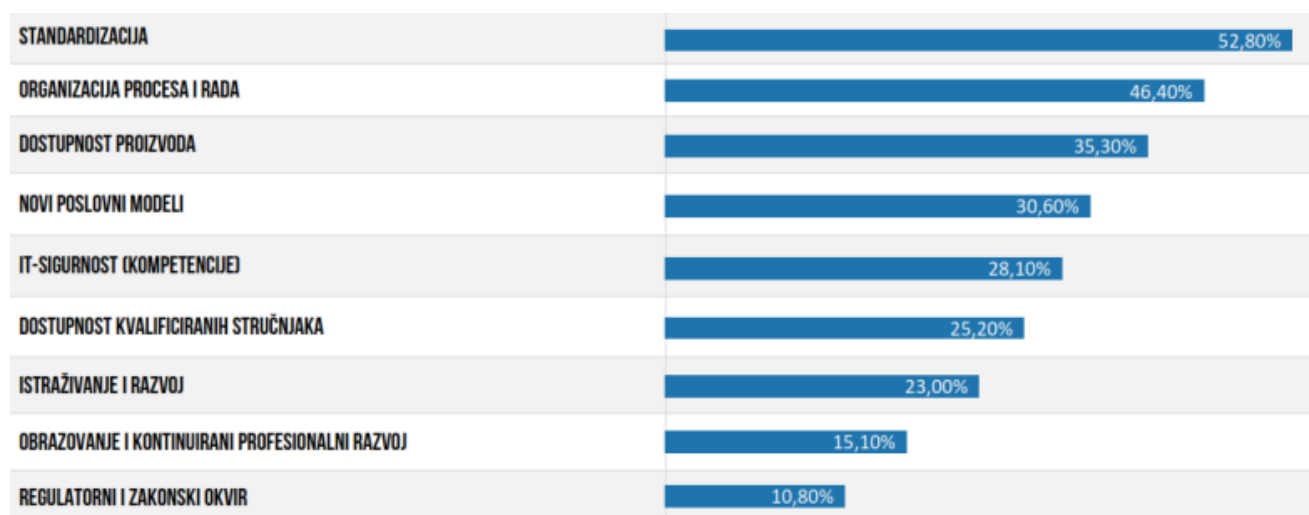
radnom snagom. Tvrtke koje se odluče na implementaciju Industrije 4.0 moraju imati na umu da je sigurnost podataka jedna od najvećih prijetnji s kojom će se suočiti kao i nestabilnosti i ranjivost globalnih lanaca vrijednosti.

3.6. Uvođenje Industrije 4.0

Industrija 4.0 sa svim svojim tehnologijama i prednostima djeluje vrlo privlačno te je jasan izbor za bilo koju industriju koja želi unaprijediti svoju produktivnost, efikasnost, fleksibilnosti i slično. Nažalost, u stvarnosti je situacija malo drugačija te je potrebno ispuniti određene preduvjete kako bi implementacija Industrije 4.0 bila moguća [6].

3.6.1. Preduvjete za uvođenje Industrije 4.0

Prema izvješću o preporukama za provedbu inicijative Industrije 4.0 u Njemačkoj, napravljene 2013. godine koje je uključivalo 278 tvrtki, utvrđeni su najvažniji preduvjete za implementaciju Industrije 4.0 [6] (Slika 8)



Slika 8. Preduvjete implementacije Industrije 4.0 [6]

- 1) Standardizacija sustava, platformi, protokola i veza predstavlja ključnu i referentnu arhitekturu. Ova arhitektura trebala bi pružiti tehnički opis standarada, olakšati njihovu provedbu te omogućiti jednostavniju implementaciju procesa Industrije 4.0. Za postizanje standardizacije ključna je međusobna suradnja svih poduzeća.
- 2) Organizacija rada morat će se prilagoditi promjenama u poslovnim modelima. Kontrola sustava u stvarnom vremenu će transformirati sadržaj rada i procesa, a to će rezultirati povećanom odgovornošću i potrebom za kontinuiranim napredovanjem pojedinaca

- 3) Dostupnost proizvoda odnosi se na sposobnost proizvođača da osigura stalnu, brzu i prilagodljivu dostupnost svojih proizvoda koristeći napredne tehnologije i koncepte Industrije 4.0
- 4) Novi poslovni modeli poput Lean menadžmenta koji je preduvjet za automatizaciju i digitalizaciju proizvodnje. Uspjeh Lean-a je zasnovan na kontinuiranom poboljšavanju.
- 5) Sigurnost svih sustava i povjerljivih podataka mora biti na zadovoljavajućem nivou ako se želi steći povjerenje u novi tip industrije. Postavlja se pitanje hoće li tvrtke i vlade biti spremne ulagati ako im inovacije mogu biti lako preotete. Vrlo je lako moguć scenarij da neka tvrtka ulži veliku količinu novca u razvoj novih proizvoda, a zatim da bude pokradena od strane hakera ili druge tvrtke.
- 6) Obučena radna snaga od koje se očekuje da posjeduju potrebno znanje i vještine za rad u digitaliziranoj industriji. Najveći problem sveopće digitalizacije posla predstavlja nestašica radne snage pa stoga države potiču zanimanje djece za digitalne tehnologije od najranije dobi kako bi se izbjegao taj problem. Nasuprot toga, postavlja se pitanje kakve su implikacije u smislu zapošljavanja za one koji ne posjeduju potrebne vještine.

3.6.2. Čimbenici spremnosti za uvođenje Industrije 4.0

Prije primjene konceptata Industrije 4.0 potrebno je odrediti koliko je poduzeće spremno na taj korak, tj. potrebno je izračunati koeficijent spremnosti za uvođenje Industrije 4.0. Čimbenik spremnosti trebao bi biti izračunat kao točan pokazatelj trenutnog stanja unutar tvrtke i udaljenosti od idealnog stanja, idealnog modela prema zahtjevima Industrije 4.0, a to će omogućiti izradu preciznog strateškog i investicijskog plana za prijelazno razdoblje digitalizacije [31]. Postoji nekolicina „modela spremnosti“ koje se mogu koristiti za procjenu spremnosti, a neke od njih navedene su u nastavku.

1) IMPULS

Model IMPULS temelji se na sveobuhvatnom skupu podataka, a pojedinosti o dimenzijama, stavkama i pristupu su dostupne. Problem kod ovog modela jest samoprocjena poduzeća, tj. ovisno o tome tko u poduzeću ispunjava navedenu anketu, rezultati mogu biti drastično drugačiji [32].



Slika 9. 6 dimenzija IMPULS metode[32]

IMPULS model (slika 9) se sastoji od šest glavnih dimenzija podijeljenih na 18 kategorija prema kojima se procjenjuje zrelost poduzeća za primjenu koncepta Industrije 4.0. Za provedbu procjene poduzeća koristi se anketa u kojoj se od ispitanika traži da daju procjenu na kojem su „nivou“ određene dimenzije njihovog poduzeća [32].

2) Industry 4.0 Maturity Model

Ovaj model je jedan od znanstveno najpriznatijih modela za izračun spremnosti na Industriju 4.0. Model uključuje elemente zrelosti podijeljene u 9 dimenzija poduzeća kao što je prikazano u tablici 3 [33].

Tablica 3. Dimenzije poduzeća prema Industry 4.0 Maturity Model-u [33]

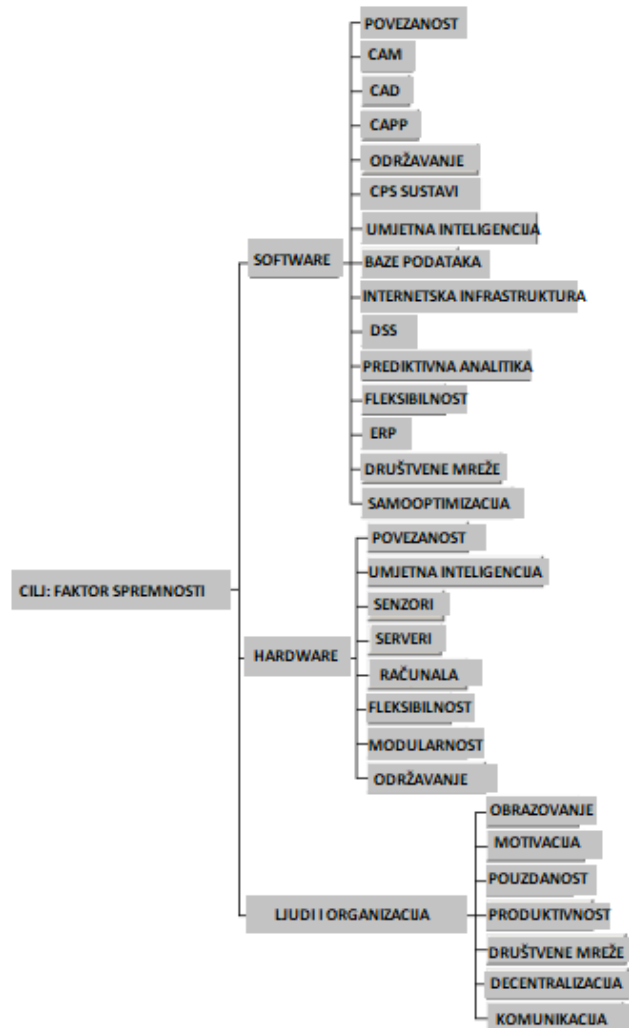
DIMENZIJA	ELEMENT ZRELOSTI
Strategija	Dostupni resursi za ostvarivanje ciljeva, prilagodba poslovnih modela...
Vodstvo	Upravljačke kompetencije i metode, postojanje centralne komunikacije za Industriju 4.0, želja za vođenjem...
Kupci	Digitalizacija prodaje, iskorištavanje podataka o kupcima..

Proizvodi	Individualizacija proizvoda, digitalizacija proizvoda, integracija proizvoda u ostale sustave...
Operacije	Decentralizacija procesa, simulacije, interdisciplinarnost, suradnja odjela...
Kultura	Dijeljenje znanja, suradnja između tvrtki, vrijednost informacijsko – komunikacijskih tehnologija u tvrtki..
Zaposlenici	Otvorenost ka novim tehnologijama, autonomija zaposlenika...
Upravljanje	Radni propisi za Industriju 4.0, zaštita intelektualnog vlasništva...
Tehnologija	Postojanje modernih informacijsko – komunikacijskih tehnologija, komunikacija među strojevima

Procjena zrelosti putem elemenata zrelosti unutar poduzeća provodi se korištenjem standardiziranog upitnika koji se sastoji od jednog zatvorenog pitanja po elementu. Svako pitanje zahtijeva odgovor koji se proteže od 1 - "nije izraženo" do 5 - "vrlo izraženo". Na kraju se razina zrelosti računa kao težinski prosjek [33].

3) Metoda bazirana na AHP metodi

Ova metoda se temelji na anketiranju poduzeća te se na temelju odgovora dokučuje spremnost poduzeća. Slika 10. prikazuje kriterijsko stablo (*eng. Criteria tree*) koje predstavlja podjelu na 3 glavne grupe: hardware, software te ljudi i organizacija koji su dalje podijeljeni na podgrupe [31].



Slika 10. Kriterijsko stablo [31]

U idealnom konceptu Industrije 4.0 svaki kriterij je prisutan i potpuno digitaliziran. Cilj izračuna koeficijenta spremnosti je utvrditi prisutnost određenih kriterija i trenutačni stupanj razvoja istih [31]. Nakon definiranja kriterija, potrebno je izvršiti evaluaciju kriterija koja se u ovom slučaju provodi polustrukturiranim intervjuom. Nakon prikupljenih informacija, upotrebom jedne ili više metoda višekriterijskog odlučivanja dobit će se rezultati istraživanja[31].

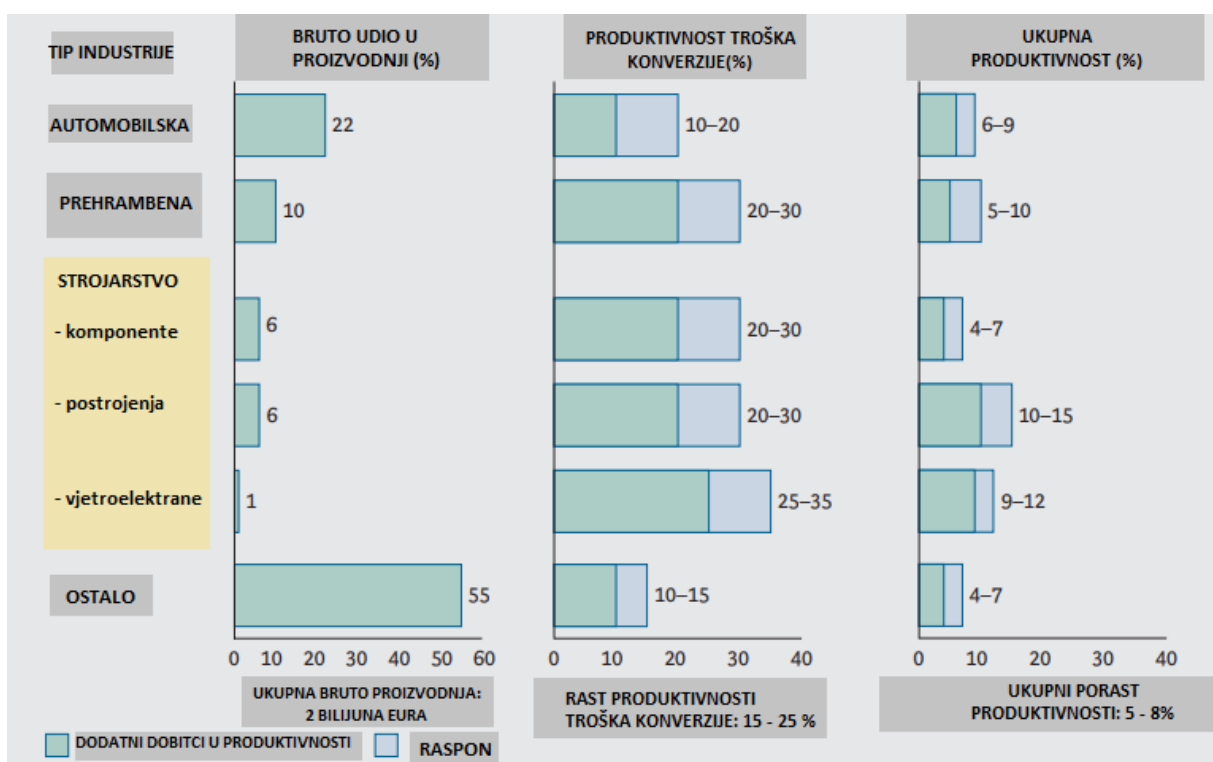
3.7. Primjeri implementacije Industrije 4.0 u svijetu

U nastavku su prikazani primjeri implementacije Industrije 4.0 u svijetu i njezin utjecaj na gospodarstvo i industrije.

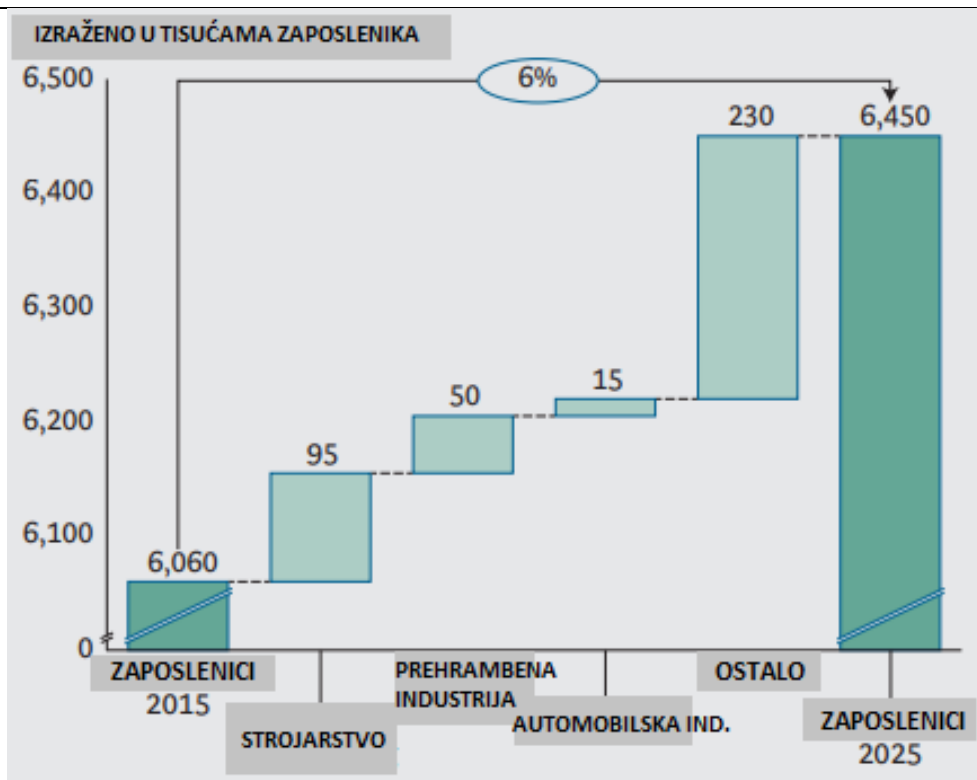
3.7.1. Potencijalni benefiti uvođenja Industrije 4.0 na primjeru Njemačke

Kako bi pružili kvantitativno razumijevanje potencijala Industrije 4.0 na svijet, provedeno je jedno istraživanje u Njemačkoj koje ističe četiri područja (slika 11) na koja će Industrije 4.0 ostaviti najveći značaj [34]:

- 1) Produktivnost – kroz sljedećih pet do deset godina uvođenje Industrije 4.0 rezultirati će porastom produktivnosti u svim proizvodnim sektorima u iznosu od 90 do 150 milijardi eura. Kada su uzmu u obzir cijena materijala, ostvarit će se porast produktivnosti od 5 do 8%.
- 2) Rast prihoda – zahtjevi proizvođača za naprednijom opremom će uzrokovati rast prihoda za 30 milijardi eura što je otprilike 1% njemačkog BDP-a
- 3) Zapošljavanje – Industrije 4.0 će potaknuti rast zaposlenja od 6% u sljedećih 10 godina, dok se u strojarstvu očekuje da taj porast bude 10% u istom periodu
- 4) Investicije – kako bi prilagodba proizvodnih tehnologija bila moguća, proizvođači će morati investirati oko 250 milijardi eura kroz sljedećih 10 godina



Slika 11. Rast produktivnosti [34]



Slika 12. Porast broja zaposlenih [34]

Slika 11 prikazuje kako će uvođenje Industrije 4.0 utjecati na povećanje produktivnosti u različitim tipovima industrija u Njemačkoj. Najveće povećanje produktivnosti može se očekivati u postrojenjima gdje će implementacijom robota i autonomnih strojeva produktivnost porasti za 10 do 15%. Osim produktivnosti, očekuje se porast u broju zaposlenih kao što je prikazano na slici 12. Predviđa se da će se u sljedećih 10 godina zabilježiti rast od 6%, a u nekim područjima čak i do 10% .

3.7.2. Smanjenje potrošnje energije na linijama za montažu vozila u stanju mirovanja

Energetska učinkovitost jedan je od ključnih zahtjeva u proizvodnji. Glavni čimbenik koji omogućuje energetska učinkovitost je sposobnost gašenja neaktivnih dijelova montažne linije u proizvodnji. U Industriji 4.0 energetska učinkovitost će postati sastavni dio planiranja procesa [6].

Danas: Mnoge proizvodne linije ili njihovi dijelovi i dalje rade za vrijeme stanki, vikenda i smjena kad nema proizvodnje što rezultira potrošnjom velike količine energije. Tako se na primjer 12% ukupne potrošnje energije proizvodne linije za montažu karoserije vozila koja koristi tehnologiju laserskog zavarivanja događa tijekom stanki. Linija radi u 3 smjene 5 dana u tjednu te ostaje upaljena tijekom vikenda, iako nije u pogonu, kako bi mogla nastaviti rad idući tjedan.

Oko 90% potrošnje energije tijekom stanki odnosi se na robote (20-30%), sustave za ventilaciju (35 – 100%), sustave hlađenja za lasere (0-50%)

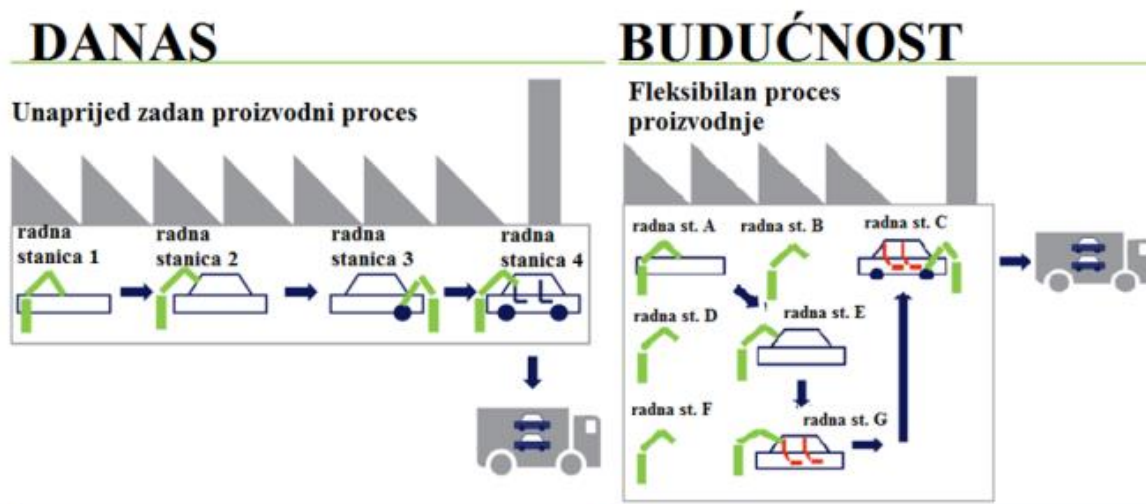
Budućnost: Mjere koje je potrebno poduzeti za poboljšanu energetska učinkovitost: isključivanje robota čak i tijekom kratkih stanki u proizvodnji, a za vrijeme dužih prekida ulaziti će u vrstu pripravnosti pod nazivom "Wake – On – LAN". Sustavi za ventilaciju koristit će motore s regulacijom brzine koji se mogu prilagoditi zahtjevima. Što se tiče sustava lasera, jedino rješenje su novi sustavi koji su energetska učinkovitiji. Uzevši ove mjere u obzir, smanjenje ukupne potrošnje energije iznositi će 12% (s 45.000 kWh/tjedno na 40.000 kWh/tjedno), a tijekom stanki očekuje se smanjenje od 90%. Ovi aspekti energetske učinkovitosti trebali bi se uzeti u obzir već u najranijim fazama projektiranja kibernetičko – fizičkih sustava.

3.7.3. Ostvarivanje individualnih zahtjeva kupca

Dinamični lanci opskrbe Industrije 4.0 omogućuju koordinaciju između izrade proizvoda i zahtjeva kupca. To pruža priliku da se kupcima dozvoli da naprave izmjenu u specifikacijama proizvoda prije ili čak za vrijeme proizvodnje [6] .

Danas: Automobilaska industrija današnjice okarakterizirana je statičnim proizvodnim linijama s unaprijed definiranim slijedom koje je teško preoblikovati radi proizvodnje novih varijanti proizvoda (slika 6). Posao radnika na proizvodnim linijama je određen funkcionalnošću proizvodne linije i obično je vrlo monoton. Kao rezultat svega, nije moguće ispuniti individualne zahtjeve kupaca kako bi se uključio element iz druge skupine proizvoda iste tvrtke, npr. ugradnja Porsche sjedala u Volkswagen.

Budućnost: S Industrijom 4.0 dolazi do pojave dinamičnih proizvodnih linija. Vozila postaju pametni proizvod koji se autonomno kreće kroz proizvodnju od jednog kibernetičko – fizičkog modula do drugog. Dinamična proizvodnja omogućava kombiniranje opreme kojom se opremaju vozila. U bilo kojem trenutku moguće je napraviti varijacije (npr. ugradnja sjedala iz druge serije vozila) kao odgovor na logističke probleme poput problema uskog grla. Ova vrsta preoblikovanja proizvodne linije je jednostavna za izvesti, a vozila se autonomno kreću prema odgovarajućoj radnoj stanici (slika 6). Središnja komponenta proizvodnje ,od početka – dizajna do kraja – montaža vozila, postaje informacijski sustav.



Slika 13. Današnji i budući izgled proizvodne linije[6]

Usporedba proizvodnih linija u automobilskoj industriji danas i u budućnosti prikazana je na slici 6. Lako se može uočiti kako su današnje proizvodne linije unaprijed strogo određene te nema mjesta za preoblikovanje radi proizvodnje novih varijanti proizvoda. Fleksibilan proces proizvodnje omogućava u bilo kojem trenutku preinake na proizvodu s ciljem ispunjavanja želja kupaca.

3.7.4. Siemensova tvornica PLC računala u Ambergu

Siemens je jedna od vodećih tvrtki kada je u pitanju implementacija Industrije 4.0. Proizveli su neke sustave koje koriste u svojim tvornicama poput MindSphere i TIA Portal v14. MindSphere je Siemensova verzija računalnog oblaka koja omogućuje nadziranje njihovih proizvoda, a TIA Portal v14 je sustav koji daje uvid u sve automatizirane procese u tvornici [35].

U svojoj tvornici u Ambergu Siemens je digitalizirao proizvodnju tako što automatizirano proizvode vlastiti sustav za automatizaciju. U njoj proizvodi i strojevi međusobno komuniciraju, a svi proizvodni procesi su upravljani putem središnjeg informacijskog sustava. Tvrtka se oslanja na elemente Industrije 4.0, poput aditivne proizvodnje, robota i digitalnih blizanaca za proizvodnju i sigurnosne mjere kvalitete kako bi neprestano povećavala produktivnost. Rezultat ovoga je 99,99885 % ispravnih proizvoda. Taj postotak je impresivan uzevši u obzir da tvrtka proizvodi 12 milijuna PLC računala svake godine [35]. 75% proizvodnje PLC računala je automatizirano, a zaposlenici su uključeni u radni proces samo na početku proizvodnje svakog računala. Za praćenje operacija u realnom vremenu zaduženo je više od 1000 senzora koji prate detalje vezane za proizvod.

3.7.5. Bosch Rexroth

Energetski troškovi su bitan faktor u proizvodnji, a tvornica Bosch Rexroth se ističe kao dobar primjer energetske učinkovitosti o kojoj je ranije bilo riječ. Koncept je taj da se mjeri točna potrošnja energije na svakoj lokaciji posebno, vrijednost potrošene energije za svaki uređaj se prenosi na energetska platformu gdje se ti podaci analiziraju, a zatim se iz tih podataka izvlače bitne informacije.

Industrija 4.0 se primjenjuje na sljedeće načine: monitoring i analiza energetske tokova, održavanje po stanju, transfer podataka putem zaštićenih tokova, praćenje kvalitete proizvodnih linija i strojeva[36].

Koristi primjene Industrije 4.0: smanjenje utroška energije, smanjenje emisije CO₂, povećana produktivnost zaposlenika zbog automatskog upravljanja energijom.

3.7.6. Scania

Još jedan primjer u području pametnih tvornica nalazi se kod tvrtke Scania, velikog proizvođača kamiona, autobusa i motora.

Scanijin proizvodni sustav temelji se na principima Lean proizvodnje, pri čemu se uvijek teži kontinuiranim poboljšanjima proizvodnog sustava kako bi postao učinkovit i efikasan. Kao dio njihovog napora za kontinuiranim poboljšanjem, poduzimaju se različite inicijative u području digitalizacije. Jedna od inicijativa je uspostava pametnog laboratorija za proizvodnju kamiona i autobusa. Cilj laboratorija je prilagoditi, procijeniti i demonstrirati tehnologije proizvodnje i logistike na jednoj geografskoj lokaciji. Tvrtka vjeruje da postoji potreba za okupljanjem nekoliko tehnologija na jednom mjestu kako bi se mogao prikazati i procijeniti puni potencijal digitalizacije.



Slika 14. Piramida pametne tvornice – Scania [37]

Trenutno se razvija i evaluira informacijski sustav koji je vođen događajima (*eng. event - driven*). Suradnički roboti, vodiči za vozila u automobilskoj industriji, ručni alati i razni senzori povezani su kako bi se mogla kontrolirati oprema i prikupljati podaci u stvarnom vremenu. Također, povezani su alati za pripremu proizvodnje za vizualizaciju, simulaciju i kontrolu [37]. Do sada se tvrtka fokusirala na tri niža stupnja Scanijske piramide pametne tvornice (slika 14), tj. standardizaciju, povezana tehnologija i prikupljanje podataka, ali Scania sada teži i višim razinama u piramidi kako bi mogla analizirati podatke, predviđati i propisivati [37].

3.8. Studije slučaja za Industriju 4.0

U nastavku će biti prikazane dvije studije slučaja vezane uz Industriju 4.0.

3.8.1. Implementacija Matics sustava u pogon poduzeća Jolybar [38]

Izazov: Jolybar je poduzeće koje se bavi proizvodnjom i opskrbom materijala za širok spektar industrija, uključujući farmaceutsku industriju, prehrambenu industriju, elektroničku industriju i još mnoge druge. U svom poslovanju Jolybar pruža uslugu garantirane dostave između 24 i 72 sata nakon zaprimanja narudžbe što znači da postoje zahtjevi da njihove operaciju budu agilne i sposobne brzo se prilagoditi promjenama na proizvodnom tržištu. Zastoje bi mogli rezultirati odgodom radnih naloga, često zahtijevajući dodatne sate kako bi se osiguralo ispunjenje rokova. Ovakvi zahtjevi za brzom isporukom proizvoda doveli su poduzeće u situaciju da potraži rješenje za navedene izazove:

- Gubitci vremena zbog neučinkovite analize i reakcije na zastoje u proizvodnji
- Netočno i neprecizno prikupljanje podataka i izvještavanje
- Nedostatak preglednosti koji je činio evaluaciju procesa nepraktičnom
- Potreba za rješenjem koje se može brzo i učinkovito implementirati uz brzo usvajanje od strane uprave i nadzornika proizvodnje
- Neučinkovita implementacija ključnih pokazatelja uspjeha za evaluaciju i optimizaciju proizvodnje

Kako bi poboljšali dostupnost strojeva, Jolybar bi trebao moći brzo identificirati događaje, obavijestiti odgovarajuće članove tima, analizirati problem i primijeniti ispravku problema. Kašnjenja u bilo kojem koraku na kraju bi značila smanjenu produktivnost.

Prije suradnje s Matics-om, obrada radnih naloga vršena je ručno, podaci poput vremena početka i završetka pojedinih radnih naloga često su bili samo približno zabilježeni, pogrešno uneseni ili čak izgubljeni, a bez tih informacija nije bilo moguće stvoriti jasni i točno

razumijevanje operacija te kako ih poboljšati. Osim netočnih i nepouzdanih zapisa o proizvodnji, Jolybar nije imao mogućnost prikupljanja i procjene podataka u proizvodnji u stvarnom vremenu. Minimiziranje bilo kakvog negativnog utjecaja je nužno, zajedno s osiguravanjem usvajanja i uključivanja kako za proizvodne timove tako i za viši menadžment. Na kraju, tvrtka je željela potrebne alate za kontinuirano poboljšavanje svojih procesa i bolje razumijevanje svoje proizvodnje.



Slika 15. Prikaz postrojenja u Jolybar-u [38]

Rješenje: Jolybar se odlučio udružiti sa Matics Solution kako bi riješio prethodno navedene probleme s kojima se suočavao.

Matics Solution pruža rješenje u obliku operativne inteligencije u stvarnom vremenu (eng. real - time operational intelligence - RtOI) koja proizvođačima pruža poboljšanu preglednost i alate potrebne za uspjeh. Suradnjom s postojećim sustavima izvedbe proizvodnje (eng. manufacturing execution system - MES) i sustavom planiranja resursa poduzeća (eng. enterprise resource planning - ERP) te izravnim prikupljanjem podataka sa strojeva, Matics omogućuje proizvođačima da iskoriste podatke putem digitalizacije.

Utjecaj na produktivnost i ispunjavanje strogih rokova isporuke bio je vidljiv ubrzo nakon implementacije RtOI platforme. Matics rješava probleme s kojima se suočava Jolybar na sljedeće načine:

1. Upozorenja u stvarnom vremenu i poboljšana komunikacija smanjuju zastoje i povećavaju dostupnost strojeva – platforma kontinuirano prati podatke o proizvodnji u stvarnom vremenu i odmah obavještava odgovorne osobe kad god se pojavi problem

što rezultira eliminacijom kašnjenja u otkrivanju problema u proizvodnji omogućavajući timovima da odmah pristupe rješavanju; proizvodni timovi umjesto pretraživanja više sustava ili čak fizičkih zapisa za potrebnim informacijama, preko Matics-a brzo i jednostavno pristupaju informacijama; poboljšanje vremena reakcije na kraju je rezultiralo poboljšanom dostupnosti strojeva, a s manje vremena utrošenog na identifikaciju i analizu problema, strojevi sada više vremena provode proizvodeći materijale, a manje izvan pogona što utječe na ispunjavanje rokova isporuke i u konačnici poboljšanu produktivnost;

2. Digitalizacija omogućuje poboljšano prikupljanje podataka i izvještavanje, povećavajući preciznost i točnost te osiguravajući da nema gubitka vrijednih informacija – umjesto oslanjanja na ručno bilježenje važnih informacija o proizvodnji, Matics rješenje automatizira ovaj proces kako bi osiguralo točnost i preciznost informacija; Jolybar sada ima pristup podacima o proizvodnji u stvarnom vremenu koje može koristiti u evaluaciji svojih procesa; točnost, pouzdanost i preciznost podataka ih čini korisnima za sastavljanje rasporeda proizvodnje umjesto oslanjanja na instinkt;
3. Nadziranje procesa u stvarnom vremenu omogućuje uvid u događaje u proizvodnji u svakom trenutku pa čak i na daljinu – zaposlenici dobivaju podatke o proizvodnji u stvarnom vremenu te mogu vidjeti te podatke na različitim razinama, od pojedinačnih strojeva do cijelog postrojenja; svaki put kad dođe do zastoja stroja, osobe zadužene za nadzor dobivaju obavijest bez obzira gdje se nalazili što im omogućuje da odmah počnu proces rješavanja problema neovisno o lokaciji; Matics je olakšao komunikaciju između proizvodnih timova i menadžmenta pa sada članovi tima mogu upozoriti nadležne u slučaju pojave kvara ili slično;
4. Razvoj i praćenje KPI-a omogućuje primjenu standardiziranih usporedbi i kontinuirano optimiziranje proizvodnje – s Matics-om, Jolybar je uspio implementirati, nadzirati i pratiti KPI-jeve kako bi poboljšao produktivnost; Jolybar sada može definirati i pratiti KPI-jeve prema potrebi kako bi nadzirao, evaluirao i optimizirao proizvodnju; povećan pristup informacijama o KPI-jevima omogućuje upravi bolje razumijevanje proizvodnje, kako u smislu događanja u stvarnom vremenu tako i u pogledu dugoročnih trendova;

Zaključak: Uvođenje Matics sustava u proizvodnju poduzeća Jolybar olakšalo je ispunjenje strogih zahtjeva za garantiranom dostavom što ih izdvaja od konkurencije. Proizvodni timovi i uprava pristupaju točnim, preciznim i pouzdanim podacima putem intuitivne platforme koja im

omogućuje praćenje svih procesa u stvarnom vremenu. Samo godinu dana nakon implementacije, Jolybar je poboljšao dostupnost strojeva za 20%, a vrijeme pripreme je smanjeno za 5%. Jolybar i Matics nastavljaju sa suradnjom i dan danas s ciljem postizanja još boljih rezultata.

3.8.2. Transformacija tradicionalne tvornice u pametnu tvornicu s naglaskom na unutarnju logistiku i proizvodnju [39]

Izazov: Tvornica se bavi proizvodnjom cijevi različitih oblika za automobilsku industriju. Cilj ove studije slučaja je pretvorba tradicionalne tvornice u pametnu tvornicu zamjenom tehnologija i procesa tehnologijama koje su karakteristične za Industriju 4.0. U nastavku će biti opisano trenutno stanje pojedinih dijelova proizvodnog procesa, što je potrebno poduzeti kako bi se implementirale nove tehnologije i izazovi s kojima se suočavamo u ovom konkretnom slučaju.



Slika 16. Primjer proizvoda [39]

Trenutno stanje: Prva stanica je ulazno skladište gdje se nalazi velika zaliha svih dijelova potrebnih za proizvodnju. Sljedeća stanica su 3 vertikalna skladišna sustava nazvana Kardex. Kardex 1 i 2 sadrži kutije s laganim i malim dijelovima poput gumenih ili plastičnih brtvi, a Kardex 3 sadrži različite vrste aluminijskih dijelova. Glavni sudionik u ovom procesu je dobavljač koji ima definirane rute unutar tvorničke hale te vizualno provjerava zalihe na montažnim linijama i uzima prazne posude s kojima se vraća do određenog Kardexa i unosi zahtjev za potrebnim materijalom. Nakon što Kardex sustav pronađe traženi materijal, predaje kutiju dobavljaču koji uklanja karticu iz kutije i predaje ju skladištaru koji bilježi smanjenje materijala i šalje tu informaciju ulaznom skladištu i tako se cijeli proces ponavlja.

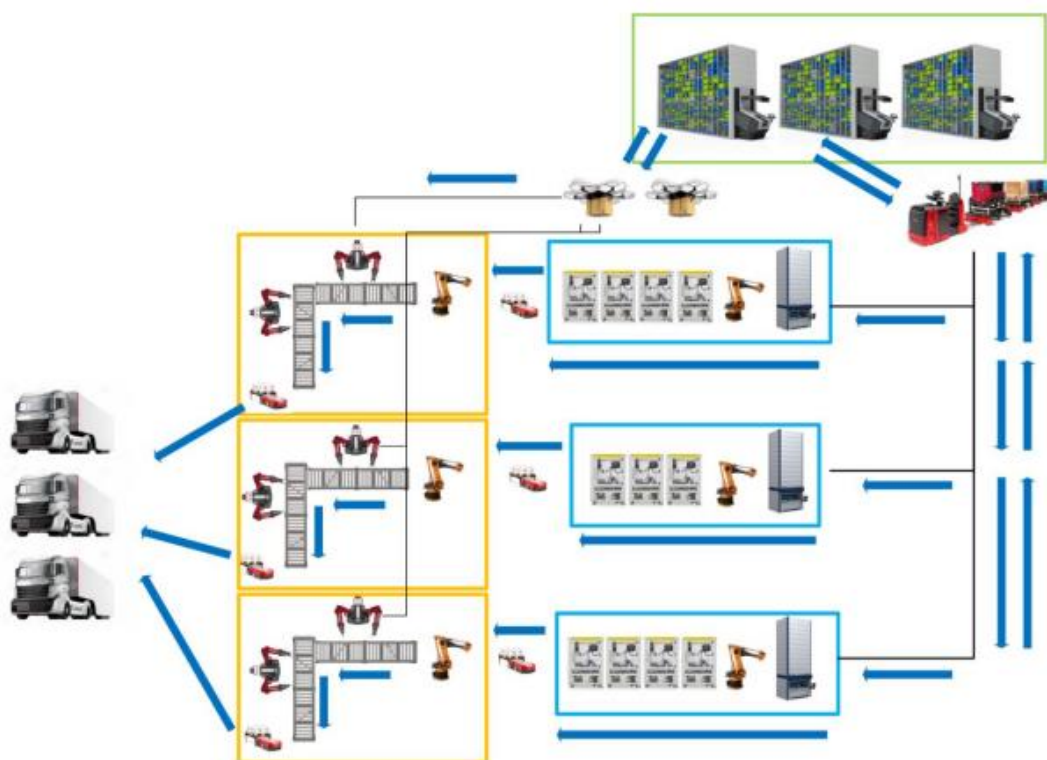
Što se tiče same proizvodnje, tvornica sadrži 7 montažnih linija i svaki kupac ima svoju montažnu liniju. Svaki kupac ima nekoliko vrsta proizvoda od kojih svaki zahtijeva drugačiji proces proizvodnje. Za montažu su potrebne cijevi i sitni dijelovi poput brtvi i prstena, a glavni procesi su savijanje i lemljenje. Neki dijelovi zahtijevaju određenu CNC obradu poput bušenja ili rezanja. Kada su ti dijelovi spremni, prenose se na montažnu liniju ili se vraćaju u skladište gdje čekaju upotrebu. Operacije montaže uključuju montažu brtvi i prstenova na cijevi, a zatim prekrivanje gumiranom oblogom. Nakon uspješne montaže slijedi radna stanica za kontrolu.

Realizacija:

1. Ulazno skladište – problem može biti riješen tako da svaka pozicija u skladištu ima svoju identifikaciju (npr. bar kod) s kojom je moguće lako traženje materijala i praćenje zaliha; podaci o stanju zaliha bi se trebali podijeliti sa dobavljačem materijala kako bi na vrijeme isporučio nove zalihe;
2. Kardex sustav – može se koristiti u trenutnom stanju samo bi se svaka kutija trebala opremiti RFID oznakom kako bi se mogla pratiti njezin sadržaj i pozicija; kutije koje sadrže manje i lakše dijelove mogli bi raznositi dronovi dok bi težim kutijama trebali manipulirati AGV-i (automated guided vehicle); prednost kombinacije dronova i AGV-a je manje zaustavljanja zbog sprječavanje sudara s obzirom da se dronovi kreću po zraku te im stoga ne smetaju fizičke prepreke i AGV sustavi; velika mana dronova jest nemogućnost upravljanja teškim kutijama; AGV-i bi trebali opskrbljivati proizvodnu liniju tako što bi prikupljali kutije iz Kardexa i pohranjivali ih na posebno označenu poziciju te ga isporučiti na odgovarajuću poziciju u proizvodnoj liniji, a nakon što ostave kutije mogli bi pokupiti prazne posude i vratiti ih u skladište;
3. Proizvodna linija – ovdje se nailazi na prvi izazov u transformaciji u pametnu tvornicu; cjelokupna proizvoda linija bi trebala biti sastavljena od modula, međutim procesi savijanja i lemljenja su previše specifični i trenutno ne postoje ni eksperimentalna rješenja za te procesne module; još jedan problem je identifikacija proizvoda što je ideja pametne tvornice no RFID oznaka se ne može implementirati u proizvod u ovom stadiju proizvodnje; do problema dolazi i kad je u pitanju manipulacija gotovih proizvoda, s obzirom da tvrtka proizvodi cijevi raznih veličina i oblika koji zahtijevaju posebne alate za rukovanje;
4. Montaža – korištenje robota izgleda kao najvjerojatnija opcija za zamjenu ljudi kad je u pitanju ovaj ponavljajući zadatak; svaki proizvod trebao bi imati dodijeljen tok

montaže i potrebne dijelove; radna stanica robota bi trebala biti opremljena malim skladišnim prostorom tipa Kardex koje će komunicirati s robotom i proizvodom i tako osigurati potrebne dijelove; Druga varijanta montaže je da montaža može biti jedan od modula pri čemu roboti više nisu potrebni nego sve aktivnosti vezane za montažu obavljaju ljudi opremljeni pametnim naočalama ili nekom drugom vrstom vizualizacije;

5. Kontrola kvalitete – kontrola kvalitete mogla bi se vršiti pomoću robota koji bi koristili silu kako bi provjerili jesu li svi proizvodi dovoljno čvrsti i postoje li neki neispravni dijelovi;



Slika 17. Shema pametne tvornice [39]

Rezultati: Na temelju pokušaja transformacije tradicionalne tvornice u pametnu tvornicu na ovom konkretnom primjeru zaključeno je da nije moguće izvršiti transformaciju zbog prespecifičnih procesa proizvodnje. Glavni problemi su identifikacija proizvoda u stvarnom vremenu i proizvodna linija. Kada je riječ o identifikaciji proizvoda u stvarnom vremenu, nije moguće postaviti RFID oznaku koja bi opstala tijekom cijelog procesa proizvodnje zbog prirode operacija poput savijanja, rezanja i CNC obrade. Također algoritmi vizualnog prepoznavanja ne mogu riješiti ovaj problem zbog prekompleksnog oblika proizvoda. Ranije je spomenut problem vezan uz prespecifične proizvodne postupke (savijanje, lemljenje) u smislu modula kada pričamo o proizvodnoj liniji, ali problem se također javlja prilikom punjenja

posuda materijalom iz skladišta zato jer nakon što je dobavljač prikupio materijal skladištar mora evidentirati smanjenje zaliha no može doći do situacije da skladištara u tom trenutku nema i tu nastaju gubitci zbog čekanja. Jednostavno rješenje za ovaj problem je automatsko očitavanje kartice i ažuriranje zaliha u skladištu.

4. INDUSTRIJA 5.0

Koncept Industrije 4.0, koji se razvija od 2011. godine, odgovoran je za stvaranje kibernetičko – fizičkih proizvodnih sustava kako bi se integrirale informacijske i operativne tehnologije u tvrtkama i lancima opskrbe. Digitalne tehnologije koje su povezane s Industrijom 4.0 u početku su počele nametati dehumanizaciju industrije, tj. zamjenu ljudi robotima i inteligentnim, autonomnim strojevima i uređajima. U [40] prvi put se spominje problem dehumanizacije gdje je primijećeno da postoji potreba za simbiozom između ljudi i novih tehnologija te da je potrebno koristiti ljudski um kako bi surađivao s inteligentnim strojevima i iskoristio svoj potencijal u proizvodnom procesu. Na osnovu rečenoga, predložen je model koji bi stavljao čovjeka u središte kibernetičko – fizičkog sustava, tzv. ljudsko – kibernetički – fizički sustav (*eng. Human Cyber – Physical System*). Tako je nastao koncept Industrije 5.0, diktiran potrebom otkrivanja uloge ljudi u kibernetičko – fizičkim sustavima.

Općenito, koncept Industrije 5.0 trebao bi učiniti suvremenu industriju održivijom i usmjerenom prema čovjeku [41]. Glavni fokus Industrije 5.0 jest interakcija između ljudi i strojeva te stvaranje zdravog odnosa među njima [42]. Ljudi bi trebali biti u simbiozi sa strojevima u povezani sa pametnim tvornicama preko pametnih uređaja [43]. Svijet tehnologije, masovne personalizacije i napredne proizvodnje prolazi kroz brze promjene. Pametni uređaji i strojevi, zahvaljujući razvojem umjetne inteligencije, bi trebali biti povezani s ljudskim umom i raditi skupa kao suradnici, a ne kao suparnici [41].

Industrija 5.0 donosi nove tehnološke napretke, ali donosi i novo shvaćanje suradnje čovjeka i robota. Roboti su strojevi koji su do sada bili programirani da obave neki zadatak ili niz zadataka. Davanje ljudskih osobina robotu, stvorilo je novu vrstu robota, to jest kolaborativnih robota (*eng. Cobots*). Ti roboti su namijenjeni za interakciji između čovjeka i robota. Naravno nove inovacije znače i nova radna mjesta, stoga se predviđa otvaranje novih radnih mjesta kao na primjer Chief Robotics Officer koji je stručnjak u području razumijevanja robota i njihove interakcije s čovjekom [41].

Valjalo bi svakako napomenuti kako ekološka osviještenost ima velik utjecaj na današnji svijet te ju ne treba olako shvatiti. Europska Komisija, u kontekstu Industrije 5.0, u svom izvješću 2021. Godine opisuje Industrijom 5.0 kao bolje prilagođenu ekonomskim i okolišnim zahtjevima zelene proizvodnje za industriju s nultom stopom emisija ugljika i energetski učinkovitu. Nadalje, navode da se tijekom posljednjih deset godina Industrija 4.0 manje usredotočila na principe socijalne pravde i održivosti te se više fokusirala na digitalizaciju i tehnologije potpomognute umjetnom inteligencijom kako bi povećala učinkovitost i fleksibilnost

proizvodnje. Koncept Industrije 5.0 ima za cilj pružiti drugačiji fokus i naglasiti važnost istraživanja i inovacija kako bi podržao industriju u dugoročnoj službi čovječanstvu unutar planetarnih granica [44].

Uzimajući u obzir sve prethodno rečeno o Industriji 5.0, neka sveobuhvatna definicija Industrije 5.0 bi glasila: Industrija 5.0 je industrijska evolucija usmjerena prema čovjeku koja objedinjuje agilne, podatkovno vođene digitalne alate Industrije 4.0 i usklađuje ih s visoko obučanim ljudima koji rade s suradničkom tehnologijom, rezultirajući inovativnim, personaliziranim, prilagođenim, visokovrijednim, ekološki optimiziranim, visokokvalitetnim proizvodima [45]. Industrija 5.0 stavlja velik naglasak na otpornost i održivost. Smanjenje ekološkog utjecaja proizvodnih procesa, korištenje naprednih tehnologija za efikasnije korištenje resursa, integracija ljudi i tehnologije radi brže prilagodbe na promjene u radnim uvjetima, obrazovanje radne snage su samo neki od načina kako otpornost i održivost stvaraju sinergiju između tehnoloških inovacija, društvene odgovornosti i ekoloških ciljeva kako bi se izgradio otporan i dugoročno održiv sustav [45].

4.1. Industrija 5.0 – nastavak Industrije 4.0 ili njen nasljednik

S obzirom na brzu i iznenadnu pojavu Industrije 5.0, dok se Industrija 4.0 nije još u potpunosti implementirala u industriju, često se postavlja pitanje „Je li Industrija 5.0 nastavak Industrije 4.0 ili njen nasljednik?“. Odgovor na to pitanje može se pronaći u raznim znanstvenim člancima.

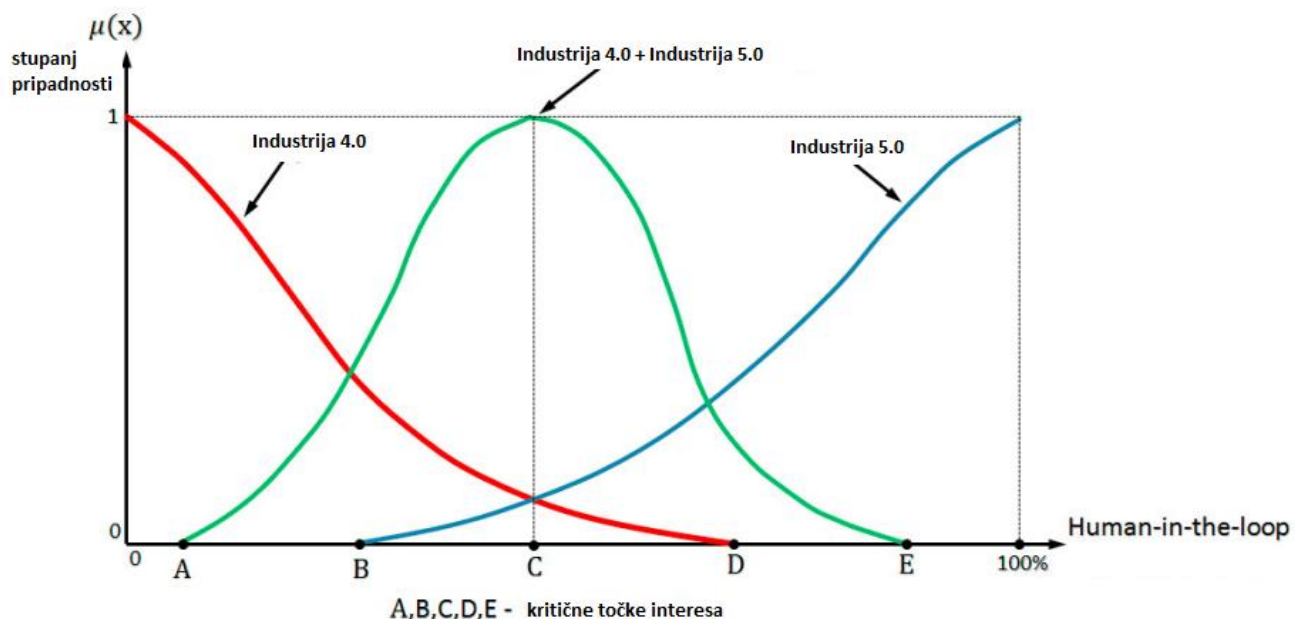
Početnu ideju s nazivom Industrije 5.0 dao je Michael Rada koji je smatrao da će nakon implementacije koncepta Industrije 4.0 biti prisutna totalna automatizacija u kojoj će čovjek biti suvišan[46]. Tvrdio da je potrebno vratiti čovjeka u proces proizvodnje na neki drugi način s čime su se složili i drugi autori. Direktor tvrtke Universal Robots E.H. Østergaard smatrao je da će mali broj radnika koji ostanu raditi u tvornici nakon uvođenja Industrije 4.0 raditi poput strojeva. Nadalje, ističe važnost vraćanja ljudi u proizvodnju uz korištenje novih tehnologija poput kolaborativnih robota (eng. *Collaborative Robots*), odnosno kobota. Tvrdi da je Industrija 5.0 više anti industrijska jer je to povratak na vrijeme prije industrijalizacije, povratak kada su se cijenile vještine i znanje [47]. S vremenom se prihvatio stav da je Industrije 5.0 novi oblik suradnje čovjeka i robota sa svrhom iskorištenja preciznosti i snage strojeva te iskorištenja ljudskih vještina poput kognitivnog i kritičkog razmišljanja. Prodor u procese proizvodnje zajedničkim radom kobota i čovjeka pojedini autori nazivaju „revolucijom ljudskog dodira“ [48], [49]. Smatra se da je to ponovni povratak radnika u proizvodni proces koristeći pri tome prednosti automatizacije i kognitivne sposobnosti ljudi [49].

Zanimljivo gledište na ovu temu prezentira članak [50] koji uspoređuje dva načina za suočavanje s Industrijom 4.0 i Industrijom 5.0 istovremeno: suživot u izolaciji jedno od drugog ili transformacija usmjerena na prelazak sa Industrije 4.0 na Industriju 5.0.

Suživot - Industrija 4.0 često se prepoznaje kao industrija vođena tehnologijom, dok je Industrija 5.0 usmjerena na vrijednosti. Industrija 5.0 dopunjuje i proširuje značajke Industrije 4.0 stoga je moguć njihov suživot. Pokazatelj takvog suživota je pojava vrste socijalno-tehničke-revolucije, pri čemu je tehnologija sredstvo omogućavanja, a društvene potrebe krajnji cilj. Uspješan suživot Industrije 4.0 i Industrije 5.0 značio bi povećanje produktivnosti bez uklanjanja ljudskih radnika iz proizvodnih procesa. Također, [51] tvrdi da oba okvira mogu suživjeti dok će Industrija 5.0 dopuniti postojeći paradigmu Industrije 4.0 s naglaskom na radnika, čija je uloga istaknuta tijekom pandemije COVID-19.

Tranzicija – tranzicija iz Industrije 4.0 i Industriju 5.0 je moguća, ali na umu treba imati tri ključne značajke Industrije 5.0: usmjerenost na čovjeka, održivost i otpornost s naglaskom na načela održivog razvoja i kvalitete života [52]. Nadalje, ističe se važnost personificiranog ekonomskog utjecaja za uspješan proces transformacije od Industrije 4.0 prema Industriji 5.0 putem implementacije pravila 4C: kritičko razmišljanje (*eng. critical thinking*), komunikacija (*eng. communication*), suradnja (*eng. collaboration*) i kreativnost (*eng. creativity*). Ljudska uloga u tranziciji treba biti usmjerena na održivi razvoj u ekonomskim, okolišnim i društvenim aspektima. Zanimljivo je da, iako se Industrija 5.0 okreće prema čovjeku, prijavljen je otpor zaposlenika prema istoj što je posljedica bržeg razvoja tehnologije nego što se zaposlenici uspijevaju prilagoditi [53].

Hibrid – umjesto tranzicije ili suživota razvijen je hibridni model koji predstavlja integraciju koncepata Industrije 4.0 i Industrije 5.0. Problem se javlja prilikom definiranja koliko čovjek treba biti uključen u procese. Implementacija Industrije 4.0 nije u potpunosti vjerna sloganu „Čovjek izvan petlje“ (*eng. „human – out – of – the – loop“*) isto kao što implementacija Industrije 5.0 nije u potpunosti vjerna sloganu „Čovjek u petlju“ (*eng. „human – back – in – the – loop“*). Oba koncepta imaju dosta nedefinirane granice te mogu biti opisana teorijom neizrazitih skupova (*eng. Fuzzy set theory*) kao što je prikazano na slici 18.



Slika 18. Prikaz koncepta Industrije 4.0, Industrije 5.0, njihovog hibrida kao teorija neizrazitih skupova [50]

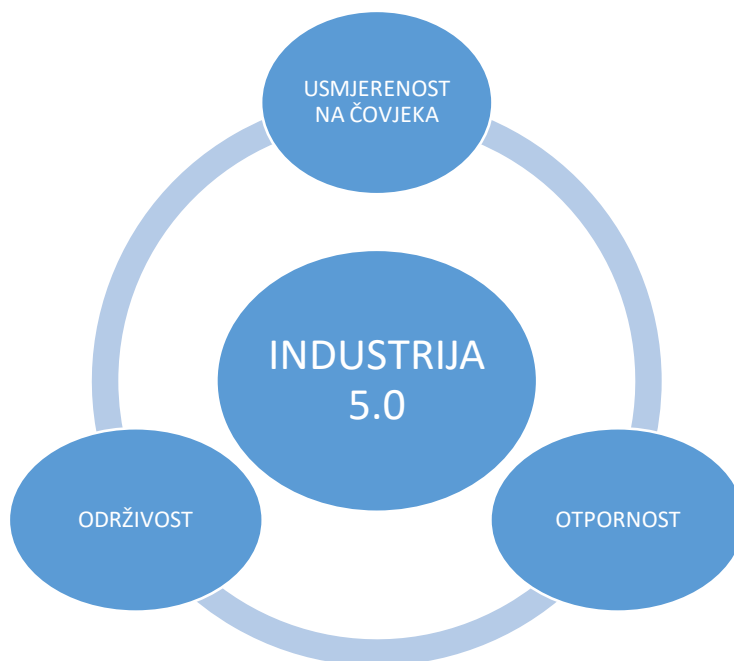
Slika 18 jasno prikazuje da Industrije 5.0 pretpostavlja veću ljudsku uključenost, ali još uvijek nije jasno koliko točno, odnosno nepoznata su točna mjesta točaka B i D. Međutim može se primijetiti da je $B < D$ što ukazuje da ne postoji jasna granica između konceptata Industrije 4.0 i Industrije 5.0. Potencijalni hibridni model se može smjestiti između tako da su točna mjesta točaka A i E (označavaju granice stupnja ljudske uključenosti) nepoznata. S obzirom na sve rečeno, treba se zapitati je li pametna tvornica „pametna“ zbog ljudi koji u njoj rade ili zbog autonomnih sustava koji samostalno donose odluke[50]. Industrija 4.0 je pristranija automatizaciji, a Industrija 5.0 više naginje prema čovjeku. Hibridni model bi u svakom slučaju mogao bit istovremeno pristran automatizaciji i čovjeku.

4.2. Ključne značajke Industrije 5.0

Kao što znamo otprije, Industrije 4.0 se bazira na konceptu pametne tvornice koja koristi najsuvremenije tehnologije poput Interneta stvari, računarstva u oblaku, kibernetičko – fizičkih sustava, proširene stvarnosti, aditivne proizvodnje i slično. Sve navedeno doprinosi povezivanju virtualnog i stvarnog svijeta kako bi se postigli što bolji rezultati u proizvodnji s maksimalnim profitom. No, tu nastaje problem pošto pristup vođen isključivo profitom nije održiv na duže staze. Umjesto prihvaćanja tehnologije kao ključnog elementa, naziru se neke druge ključne značajke kao okosnica nove paradigme, Industrije 5.0, a to su [54]:

- Usmjerenost na čovjeka – ljudske potrebe su stavljene na prvo mjesto te se postavlja pitanje što tehnologija može učiniti za čovjeka i kako može biti od koristi

- Održivost – fokus na ponovnom korištenju i recikliranju prirodnih resursa te smanjenju otpada i negativnog utjecaja na okoliš
- Otpornost – podrazumijeva uvođenje agilnosti u industrijske procese kako bi svojom fleksibilnošću sustavi bili sposobni odgovoriti na krizne situacije.



Slika 19. Ključne značajke Industrije 5.0 [54]

Usmjerenost na čovjeka

Usmjerenost na čovjeka predstavlja naglasak na suradnji između ljudi i tehnologije kako bi se postigla inovativna, personalizirana, prilagođena proizvodnja. Industrija 5.0 koristi agilne, podatkovno vođene digitalne alate Industrije 4.0 te ih integrira s visoko obučanim ljudima koji rade s kolaborativnim tehnologijama s ciljem ostvarenja ravnoteže između automatizacije i ljudske interakcije te sa željom da potaknu inovacije, održivost i poboljšanje kvalitete života. U Industriji 5.0 znatno se mijenjaju uloga radnika u industriji. Radnika ne treba smatrati troškom, već prije kao investiciju, omogućavajući radniku i poduzeću razvoj. To implicira da je poslodavac zainteresiran za ulaganje u vještine, sposobnosti i dobrobit svojih radnika, kako bi postigli svoje ciljeve. Kao što je ranije spomenuto, važan preduvjet Industrije 5.0 jest da tehnologija služi ljudima, a ne obratno. U industrijskom kontekstu to znači da se tehnologija, koja se koristi u proizvodnji, prilagođava potrebama radnika u industriji, umjesto da se radnik kontinuirano prilagođava tehnologiji koja se stalno razvija. Radnici postaju suradnici s pametnim strojevima, a naglasak je na stvaranju radnih mjesta i očuvanju uloge ljudi u

proizvodnom procesu. Ova usmjerenost na čovjeka naglašava važnost ljudskog kapitala, kreativnosti te suradnje i komunikacije unutar radnih okolina.

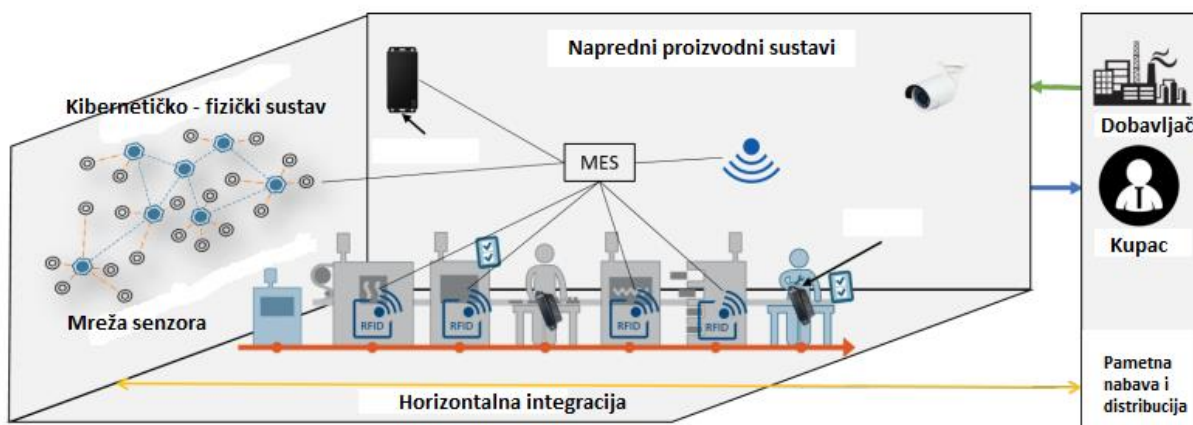
Stavljajući radnika u središte industrijske proizvodnje uz pomoć alata poput ranije spomenutih koboti, Industrija 5.0 ne samo da daje kupcima proizvod koji oni žele, već daje radnicima posao koji je značajniji od običnog posla u tvornici [47]. Strah od gubitka posla s pojavom novih, naprednih tehnologija je opravdan s obzirom da postoje slučajevi gdje automatizirani sustavi uklanjaju potrebu za radnicima. Stoga Industrija pokušava eliminirati taj strah vraćajući čovjeka u središte procesa, ali to ne znači da i dalje nisu potrebni radnici koji posjeduju širok spektar znanja i vještina te sposobnost na brze prilagodbe.

Suradnju čovjeka i strojeva možemo vidjeti u nekolicini projekata. Prvi od tih projekata jest Factory2Fit koji ima za cilj osnaživanje i angažiranje radnika u povezanijem industrijskom okruženju. Osnovna ideja u projekta jest ta da je radnik stručnjak za vlastiti posao te stoga treba imati aktivnu ulogu u oblikovanju svog rada. Predložena rješenja adaptivne automatizacije temelje se na dinamičkom korisničkom modelu koji uključuje fizičke i kognitivne sposobnosti [55]. Sam radnik dobiva povratne informacije o svojoj izvedbi i vještinama, što podupire kontinuirano učenje i razvoj kompetencija. Radnicima je omogućen veći utjecaj, a time i veća odgovornost u oblikovanju procesa proizvodnje. Virtualni modeli tvornica koristit će se kao platforme za sudioničko oblikovanje radnih praksi, dijeljenje znanja i obuku, uključujući sve relevantne dionike u doprinosu organizacijskom razvoju. Kontekstualno vođenje i dijeljenje znanja podržavat će se alatima temeljenima na proširenoj stvarnosti. Rješenja adaptivne automatizacije koja će se razviti u sklopu Factory2Fit (Slika 20) podržavat će suradnju između ljudi i sustava te će imati utjecaja na radno zadovoljstvo, manje problema s zdravljem, manje stresa, bolju ergonomiju, bolju kvalitetu, manje pogrešaka i bolju produktivnost [55].



Slika 20. Factory2Fit [56]

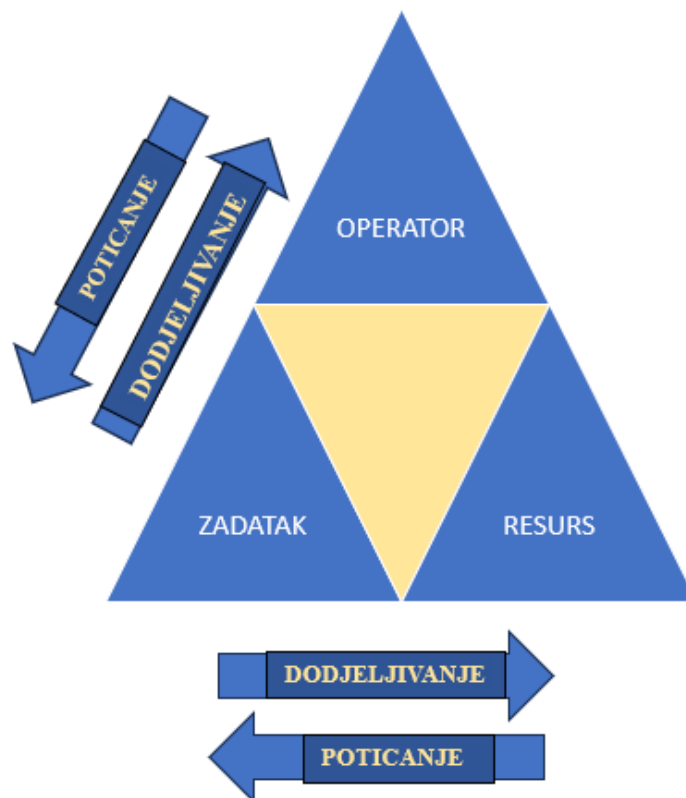
Kao drugi primjer ističe se koncept Operatora 5.0., koji uključuje cyber-fizičke sustave i inteligentne prostore. Koncept ima za cilj proširiti mogućnosti radnika u industriji inovativnim tehnološkim sredstvima umjesto zamjene radnika robotima.



Slika 21. Inteligentni prostor [57]

Inteligentni prostor prikazan na slici 21 usko je povezan sa konceptom Operator 5.0. U tom prostoru kontinuirano se prate događaji pomoću distribuiranih inteligentnih mrežnih uređaja koji se sastoje od umreženih senzora. Oni operaterima daju povratne informacije putem fizičkih uređaja poput mikrofona ili zaslona. Primjer ovakvog inteligentnog prostora je predstavljen laboratoriju Hashimoto na sveučilištu Tokyo gdje je inteligentni prostor dizajniran sa svrhom

virtualne i fizičke potpore radnicima i robotima [58]. Takvi inteligentni prostori pomažu operaterima da izvrše svoj posao sa što većom učinkovitosti.



Slika 22. Veza resursa, korisnika i zadatka [57]

Resursi, korisnici i zadaci su tri temeljna elementa inteligentnog prostora. Slika 22 prikazuje model operator - resurs - zadatak. Taj model podržava dizajn interakcije među ovim komponentama, čije se interakcije trebaju rješavati kako resursi potiču (*eng. trigger*) zadatke i kako se zadaci dodjeljuju (*eng. appoint*) operatorima na temelju njihove dostupnosti, izvedbe i sposobnosti [57]. Inteligentni prostor bi trebao odgovarati na zahtjeve ljudi tako što bi identificirao aktivnosti operatora pomoću kamera ili sustava pozicioniranja, a podaci koje prikupe senzori se prenose i obrađuju računalima. Stoga se svaki događaj koji uključuje ili mijenja parametre unutar prostora analizira i obrađuje

Održivost

Uvođenjem novih tehnologija, razvoj novog, održivog poslovnog modela postaje neizbježan. Glavni problem s kojim se susrećemo prilikom razvoja novog poslovnog modela jest balans između profita, društvenih i ekoloških benefita, prilagodba resursa i procesa za nove poslovne modele te korištenje postojećih metoda i alata za oblikovanje poslovanja [59]. Jedan takav model predstavljen je od strane Europske zaklada za upravljanje kvalitetom (*eng. European*

Foundation for Quality Management). Primarni fokus tog modela je održivost te je usklađen sa 17 ciljeva održivog razvoja UN-a koji bi trebali biti ostvareni do 2030. godine.



Slika 23. Presjek Industrije 5.0 i održivosti [60]

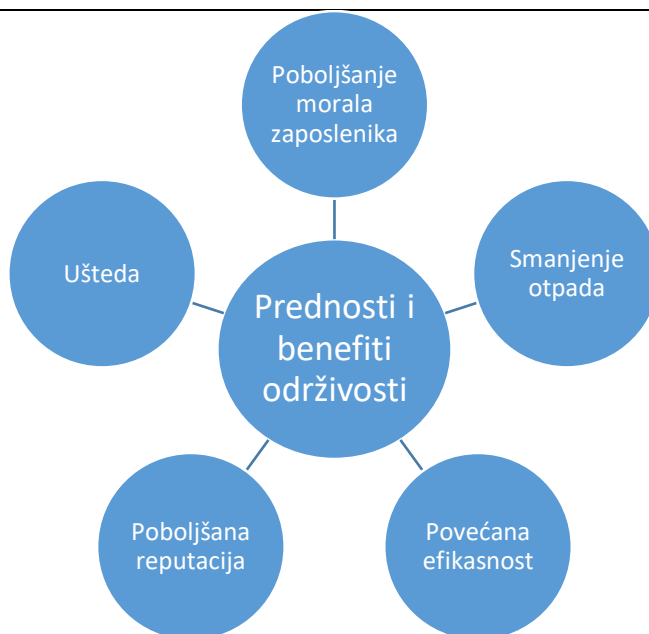
Slika 23 prikazuje presjek Industrije 5.0 i održivosti. Iz prikazanog se može vidjeti da oboje dijele neke zajedničke karakteristike poput „zelene“ tehnologije, kružne ekonomije i efikasnosti resursa. No, naravno postoje stvari u kojima se ne poklapaju, ali treba napomenuti kako je potrebno postići simbiozu između 2 pojma kako bi se mogla ostvariti pametna proizvodnja gdje ljudi i strojevi međusobno surađuju kako bi proizveli personalizirane proizvode uz istovremeno očuvanje okoliša efikasnim korištenjem resursa i obnovljivih izvora energije.

Koncept održivosti počiva na činjenici da potrošnja resursa u današnje vrijeme nema utjecaja na sposobnost budućih generacija da osiguraju i koriste te iste resurse[60]. Industrija 5.0 stavlja velik naglasak na ekološku osviještenost. Korištenjem moći digitalnih tehnologija poput Interneta stvari, strojnog učenja, umjetne inteligencije, napredne analitike Industrija 5.0 omogućuje razvoj novih proizvoda i usluga korištenjem ekološki prihvatljivijih procesa i smanjenjem troškova. Poduzeća su u mogućnosti smanjiti količinu energije koju koriste, poboljšati efikasnost te ostvariti velike korake kada je u pitanju ostvarenje održivosti[60]. Analiza podataka može pomoći tvrtkama s optimizacijom lanaca opskrbe i smanjiti negativan utjecaj koji imaju na okoliš, npr. tvrtke mogu primijeniti algoritam strojnog učenja koji bi analizirao i locirao perspektivna područja s ciljem smanjenja emisije stakleničkih plinova.

Upotreba tehnologija ima najvažniju ulogu u ostvarivanju održivosti. Internet stvari jedna je od tih tehnologija. Internet stvari kao što otprije znamo, je mreža međusobno povezanih uređaja koji imaju sposobnost prikupljanja i dijeljenja podataka međusobno kao i sa njihovom okolinom. Integracijom Interneta stvari, tvrtke ostvaruju mogućnost uvida u procese i donošenja odluka na temelju prikupljenih podataka što rezultira povećanom učinkovitosti, uštedom i održivosti. Npr. postavljanjem povezanih senzora koji prate potrošnju energije u stvarnom vremenu i uočavaju lokacije na kojima bi potrošnja energije mogla biti smanjena [60]. Sljedeća tehnologija koja doprinosi održivosti u konceptu Industrije 5.0 je umjetna inteligencija. Korištenjem sustava koji rade na principu umjetne inteligencije omogućeno je automatiziranje industrijskih procedura što rezultira smanjenom potrošnjom energije. Još jedna primjena umjetne inteligencije može biti u analiziranju podataka prikupljenih sensorima te detektiranjem uzoraka koji mogu biti korišteni za poboljšanje efikasnosti proizvodnog procesa i učiniti ih ekološki prihvatljivima [60].

Napredna analitika (*eng. advanced analytics*) analizom velikih količina podataka dobivenih od uređaja npr. senzora, daje uvid koji može biti korišten za unaprjeđivanje procesa i smanjenje potrošnje energije. Npr. prediktivna analitika se može koristiti za predviđanje potražnje za nekim proizvodom te na osnovu toga prilagoditi proizvodnju istog [60]. Ovo eliminira potrebu za prekomjernom proizvodnjom što rezultira smanjenjem utrošene energije.

Istraživanje koje se bavi utjecajem korištenja gore navedenih tehnologija, ali i nekih drugih poput proširene stvarnosti i računarstva u oblacima, na održivost utvrdilo je da korištenje napredne analitike rezultira uštedom energije od 11 do 14%, primjena proširene stvarnosti uštedom od 10 do 30% i 70% uštede energije korištenjem računarstva u oblacima [61].



Slika 24. Prednosti održivosti u Industriji 5.0 [60]

Slika 24. prikazuje prednosti održivosti koje su detaljnije opisane u nastavku:

- Poboljšanje morala zaposlenika – primjenom održivih modela zaposlenici će imati osjećaj da njihov posao doprinosi dobrobiti okoliša što će rezultirati poboljšanim moralom koji može dovesti do porasta motivacije i uključenosti zaposlenika, a time i poboljšanim performansama zaposlenika
- Smanjenje otpada – primjenom učinkovitijih proizvodnih procesa moguće je smanjiti količinu generiranog otpada; tvrtke također mogu investirati u recikliranje kako bi benefiti bili još izraženiji
- Povećana efikasnost – optimizacijom energije i upotrebom efikasnijih proizvodnih modela tvrtke su sposobne povećati svoju proizvodnu efikasnost; upotreba energije iz obnovljivih izvora može smanjiti količinu potrošene energije što rezultira smanjenjem troškova koji se pojave prilikom održavanja
- Poboljšana reputacija – tvrtke imaju priliku istaknuti se od konkurencije i razviti odličnu reputaciju implementacijom ekoloških praksi što na kraju rezultira povećanjem prodaje i lojalnosti kupaca
- Ušteda – implementacija ekoloških praksi kroz duže vrijeme rezultira uštedom novca, energije i resursa; poduzeća, ako pokažu da su predana dobrobiti okoliša, mogu biti oslobođena plaćanja određenih poreza.

Kako bi poduzeća uspješno prihvatila održivost, morat će se suočiti sa mnogim organizacijskim izazovima (slika 25). Prvi izazov bi mogla biti kultura unutar poduzeća koja nedovoljno

naglašava važnost ekološke osviještenosti [60]. Za uspješno prevladavanje ovog problema, poduzeća trebaju razviti kulturu održivosti u kojoj je održivost središte njihovog poslovnog modela. Zaposlenici moraju biti svjesni prednosti održivosti i mora ih se poticati na rad ka održivosti. Sljedeći izazov jest organizacijsko poravnanje [60]. Poduzeća trebaju imati ciljeve planove i procedure koje su sinkronizirane jedni s drugima. Sve razine unutar organizacije trebaju surađivati kako bi ostvarili zajedničke ciljeve i kako bi u slučaju promjena okoline poduzeće moglo brzo i prikladno reagirati. Treći izazov je investiranje u tehnologije koje su potrebne za ostvarenje održivosti [60]. Tu se ponajprije misli na investiranje u senzore, analitiku i automatizaciju zajedno s odgovarajućom infrastrukturom koja podržava navedene tehnologije kako bi se omogućila potrebna razina održivosti. Osiguranje odgovarajućeg upravljanja i kontrole još je jedan izazov [60]. Organizacije trebaju osigurati praćenje i kontroliranje aktivnosti na prikladan način što inicira da moraju imati jasno definiranu politiku i procedure kako bi garantirali da se upravljanje podacima vrši na korektan način i da je korištenje tehnologije prikladno. Nadalje, organizacije se trebaju pobrinuti da zaposlenici shvaćaju važnost ekološke osviještenosti, a to će postići provedbom instrukcija i treninga koji obuhvaćaju razne aspekte održivosti uključujući njezine prednosti i kako može biti primijenjena na radnom mjestu.



Slika 25. Izazovi implementacije održivosti [60]

Otpornost

Industrija budućnosti treba biti sposobna brzo se prilagoditi promjenjivim okolnostima kako bi osigurala ulogu održivog pokretača prosperiteta. Upravo tu do izražaja dolazi otpornost koja se smatra jednim od ključnih čimbenika Industrije 5.0. Definira ju se kao sposobnost podnošenja

smetnji i nošenja s katastrofalnim događajima pri čemu se oslanja na ljude [62]. Zajedno s održivosti i usmjerenosti na čovjeka smatra se ključnom stavkom globalnih promjena koje se događaju u industriji, ali i u ostalim područjima uključujući i društvo [63]. U jednom od modela otpornosti, ljude se smatra najvažnijom komponentom zato što su oni prvi koji uočavaju anomalije i njihovo obrazovanje, vodstvo i vještine su ključan faktor otpornosti [64]. Strateško upravljanje ljudskim resursima ima ključnu ulogu u razvijanju potrebnog znanja, vještina, sposobnosti i drugih atributa te u pozivanju na odgovarajuće kolektivne rutine i procese kako bi se generirali rezultati otpornosti [65]. Otpornost zahtijeva posebne interakcije između ljudi, autonomnih komponenata vođenih umjetnom inteligencijom i automatizacije niže razine. U [66] predložen je jedan takav model u kojemu tijek odluka započinje od operatera, zatim prelazi na autonomne kontrolne komponentne vođene umjetnom inteligencijom i na kraju na kontrole automatizacije niže razine. Uzimajući u obzir smetnje koje se mogu dogoditi iznutra ili izvana, sustav otpornosti mora biti u mogućnosti ublažiti negativne učinke i održati neprekidan rad.

Otpornost organizacije je multidisciplinarni koncept koji posjeduje unutarnje i vanjske stavke i koji podrazumijeva shvaćanje situacije, prilagodbu na novu situaciju i nošenje s ranjivostima izazvanim novom situacijom. Sposobnost tvrtke za razvoj otpornosti proizlazi iz skupa specifičnih organizacijskih sposobnosti, rutina, praksi i procesa kojima se tvrtka orijentira, djeluje kako bi napredovala i stvara okruženje raznolikosti i prilagodljive integracije [65]. Menadžment rizika jedna je od važnih unutarnjih stavki otpornosti organizacije koja uključuje planove rizika i tehnike prevencije. Pozitivan učinak na otpornost ima implementacija novih tehnologija koje su sposobne pratiti informacije bitne za organizacijsku otpornost. No, treba imati na umu da svaku novu tehnologiju koja se implementira treba dobro analizirati i uzeti u obzir koje podatke može prikupljati i kakve benefite može doprinijeti organizaciji [65].

Kada pričamo o otpornosti u kontekstu tehnologije, treba naglasiti da iako postoje napredne tehnologije poput računalstva u oblacima, integracija informacija kroz segmente, razine i procese industrije je i dalje problematična. Kao što je prethodno objašnjeno postoji horizontalna i vertikalna integracija. Vertikalna integracija predstavlja lance opskrbe, a horizontalna suradničke mreže (*eng. collaborative network*). Pandemija COVID – 19 pokazala je kako lanac opskrbe može lako biti prekinut pa su suradničke mreže viđene kao zamjena za prekinute lance opskrbe i time povećati otpornost proizvodne industrije. Problem koji se javlja kod korištenja novih tehnologija je nedostatak povjerenja, pogotovo kada je u pitanju zaštita podataka. Kao jedno od rješenja javlja se Blockchain tehnologija koja je usko povezana s Internetom stvari. Blockchain je decentralizirana mreža putem koje se izmjenjuju podaci i jednom kada se

zabilježi transakcija, više ne postoji mogućnost promjene što ju čini pouzdanom okolinom za razmjenu podataka [64].

U nastavku je priložena tablica koja prikazuje povezanost koncepata Industrije 5.0 s ljudima, organizacijom i tehnologijom.

Tablica 4. Povezanost značajki Industrije 5.0 s ljudima, organizacijom i tehnologijom u praktičnom kontekstu [51]

	LJUDI	ORGANIZACIJA	TEHNOLOGIJA
USMJERENOST NA ČOVJEKA	<ul style="list-style-type: none"> Radnici bi trebali surađivati s opremom koristeći vlastite fizičke i kognitivne sposobnosti 	<ul style="list-style-type: none"> Poboljšanje kvalitete rada pomoću digitalizacije 	<ul style="list-style-type: none"> Bolja prilagodba tehnologije ljudskim potrebama
ODRŽIVOST	<ul style="list-style-type: none"> Nova znanja i poslovi Radnici koji se mogu nositi s promjenama i koji su sposobni pomoću tehnologije dolaziti do rješenja 	<ul style="list-style-type: none"> Potporna Lean menadžmenta Novi poslovni modeli koji potiču održivost kroz društvene, ekonomske i ekološke segmente 	<ul style="list-style-type: none"> Ušteda energije Efikasno korištenje energije Analiza podataka s ciljem uštede energije
OTPORNOST	<ul style="list-style-type: none"> Radnici sa svojim vještinama i znanjima su najbitnija komponenta zato jer prvi uočavaju anomalije 	<ul style="list-style-type: none"> Skup organizacijskih sposobnosti, rutina i procesa Implementacija planova rizika i preventivnih tehnika Suradnička proizvodna mreža 	<ul style="list-style-type: none"> Integracija informacija kroz sve segmente industrije Sigurnost podataka Pametne platforme za suradničke mreže

4.3. Utjecaj Industrije 5.0 na proizvodne sustave

Prijašnje industrijske revolucije ukazuju na konstantnu promjenu proizvodnih sustava i strategija s ciljem veće produktivnosti i učinkovitosti. Kao što je ranije spomenuto, prihvaćanje

Industrije 5.0 kao sljedećeg koraka u industriji zahtijeva prilagodbu, standardizaciju i implementaciju novih tehnologija koje trebaju adekvatnu infrastrukturu.

Kada su u pitanju proizvodni sustavi, Industrija 5.0 će sa sobom donijeti izazove u području interakcija čovjeka i stroja približavajući strojeve svakodnevnom životu radnika, a tu se ponajprije misli na kobote. Koboti će posjedovati funkcionalnosti slične ljudskima poput hvatanja i interakcije sa objektima, ali na temelju namjene i okolišnih faktora [41]. Također se očekuje stvaranje novih poslova u području interakcije čovjek – stroj i računalnoj analizi ljudskih faktora (*eng. computational human factors analysis*) [41].

Industrija 5.0 će revolucionalizirati proizvodne sustave udaljavajući repetitivne, monotone zadatke od radnika kad god je to moguće. Inteligentni roboti će sa svojom mrežom senzora prodrijeti u opskrbne lance proizvodnje i proizvodne pogone do dosad neviđene razine [41]. Doći će do povećanja produktivnosti i učinkovitosti operacija koje će biti ekološki prihvatljive, smanjit će se učestalost ozljeda na radnom mjestu i smanjit će se ciklusi proizvodnje. Suprotno učestalom mišljenju, Industrija 5.0 će stvoriti više radnih mjesta nego što ih oduzme. Velik broj radnih mjesta otvorit će se u područjima umjetne inteligencije, robotike, održavanja, obučavanja radnika itd.

4.4. Ostvarivost Industrije 5.0

Kao što je ranije spomenuto, Industrija 5.0 riješit će problem povezan sa uklanjanjem ljudskih radnika iz različitih procesa. No, kako bi to ostvarila biti će potrebne još naprednije tehnologije i veća suradnja radnika i strojeva. U nastavku su navedene neke od tehnologija i karakteristika sustava koje su ključne za ostvarenje Industrije 5.0.

Međusobna povezanost podataka u mreži

Uz prisutnost autonomnih proizvodnih sustava, koboti i drugih inteligentnih sustava, postaje jasno da je prikupljanje podataka i osjetilno praćenje neizbježna komponenta Industrije 5.0, a sve je to moguće putem umreženih senzora. To također omogućava postizanje brzih analiza procesa prilagodbe. Mreža senzora s nekom osnovnom inteligencijom i sposobnošću obrade podataka bi rezultiralo smanjenjem preopterećenja mreže i stvaranjem „distribuirane inteligencije“ u mreži [41]. Jednom kad se implementiraju, ovi umreženi senzori će otvoriti mogućnost za brzom prilagodbom u procesima proizvodnje.

Sustavi praćenja na radnom području (*eng. Shopfloor Trackers*)

Sustavi praćenja poboljšavaju praćenje proizvodnje u stvarnome vremenu tako što omogućuju povezivanje narudžbi od strane kupca s narudžbama u proizvodnji. Kao rezultat toga, postiže se optimalno i učinkovito upravljanje resursima što je jedan od važnih kriterija za proizvođače.

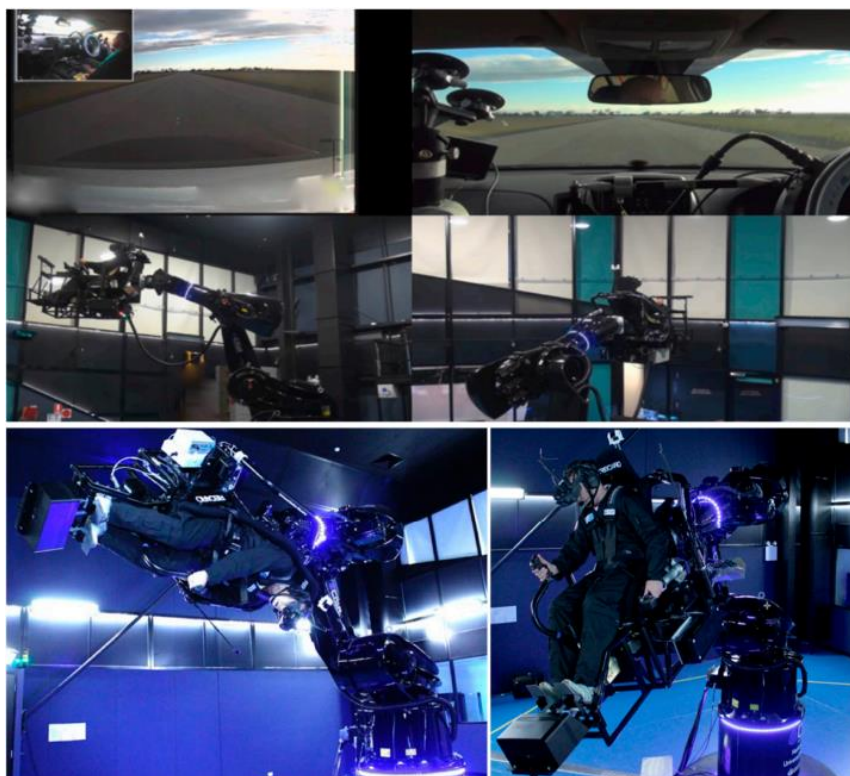
Praćenje radnog područja također omogućuje praćenje opreme i tijekom procesa i stvarnom vremenu što otvara put za beskontaktnu optimizaciju procesa proizvodnje. Nadalje, korištenjem sustava za praćenje moguće je uštedjeti na potrošnji materijala i prevenciji zloupotrebe opreme kada se kombinira sa Internetom stvari i strojnim učenjem [41].

Virtualni trening

Korištenjem virtualnog treninga, radnik stječe znanja i vještine u virtualnoj okolini kako bi bio spreman da obavljanje tog istog posla u stvarnosti. Ovakav tip obuke je jako važan u stvaranju obučene radne snage bez riskiranja produktivnosti nekog procesa ili ugrožavanja ostalih zaposlenika. Posebice je važan u poslovima i zadacima koji zahtijevaju repetitivno ponavljanje ili nepovoljnog položaja tijela.

Virtualni trening može se olakšati kombinacijom virtualne i proširene stvarnosti. Kada se kombinira s napretkom u grafičkim procesorskim jedinicama, umjetnom inteligencijom i velikim podacima (*eng. Big Data*), virtualno obučavanje postaje puno realističnije i korisnije. Tehnologije i uređaji koji imaju mogućnost haptičkog povratnog odziva (*eng. haptic feedback*) mogu imitirati stvarni osjećaj aktivnosti te stoga biti vrlo korisni [41].

Na slici 26. kao primjer virtualnog treninga prikazan je simulator pokreta koji se koristi za obuku vozača, pilota, vatrogasaca daleko od opasnosti s kojom bi se mogli susresti u stvarnim situacijama.

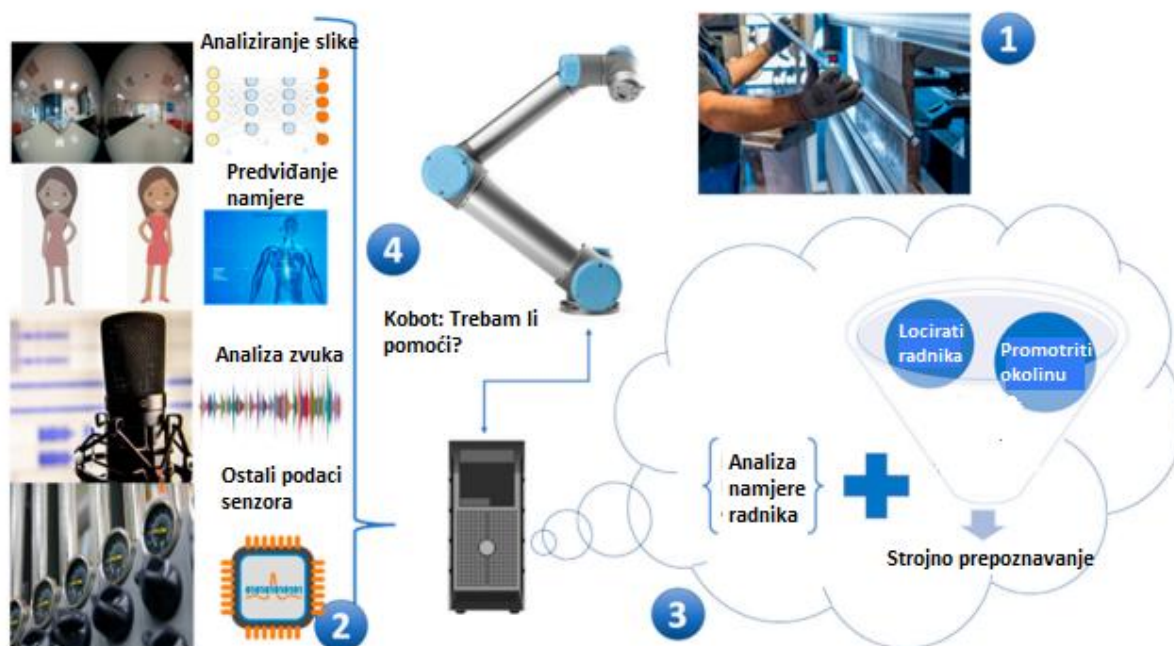


Slika 26. Primjer virtualnog treninga[41]

Napredak u osjetilnim tehnologijama i strojnom prepoznavanju

Inteligentni autonomni sustavi će ovisiti o repliciranju osjetila koja ljudi koriste za surađivanje i stjecanje znanja. Računalni vid u kombinaciji s dubokim učenjem i podržanim učenjem (*eng. Reinforcement learning*) pokazuje obećavajuće rezultate u repliciranju primitivnog vida i osjetilnih sposobnosti. Značajan napredak u ovom pogledu potreban je kod kobota. Na primjer, čovjek će, koristeći svoju emotivnu inteligenciju, prestati raditi ako osjeti da nešto neobično u svojoj okolini čak i kad nema fizičkih naznaka da nešto nije u redu [41]. Ovakvo predviđanje je vrlo važno za sprječavanje nezgoda na radnom mjestu.

Strojno prepoznavanje se također treba unaprijediti kako bi donosili najbolje odluke u stalno mijenjajućoj okolini, ali razvoj takvog naprednog sustava koji se može prilagođavati nije lako uspostaviti uzimajući u obzir trenutnu tehnologiju. Nadalje, ostale tehnologije koje se baziraju na sensorima moraju biti unaprijeđene kako bi mogle replicirati ponašanje ljudskog operatera u danoj situaciji. Slika 27. prikazuje princip rada kobota prilikom asistiranja u nekom radnom zadatku.



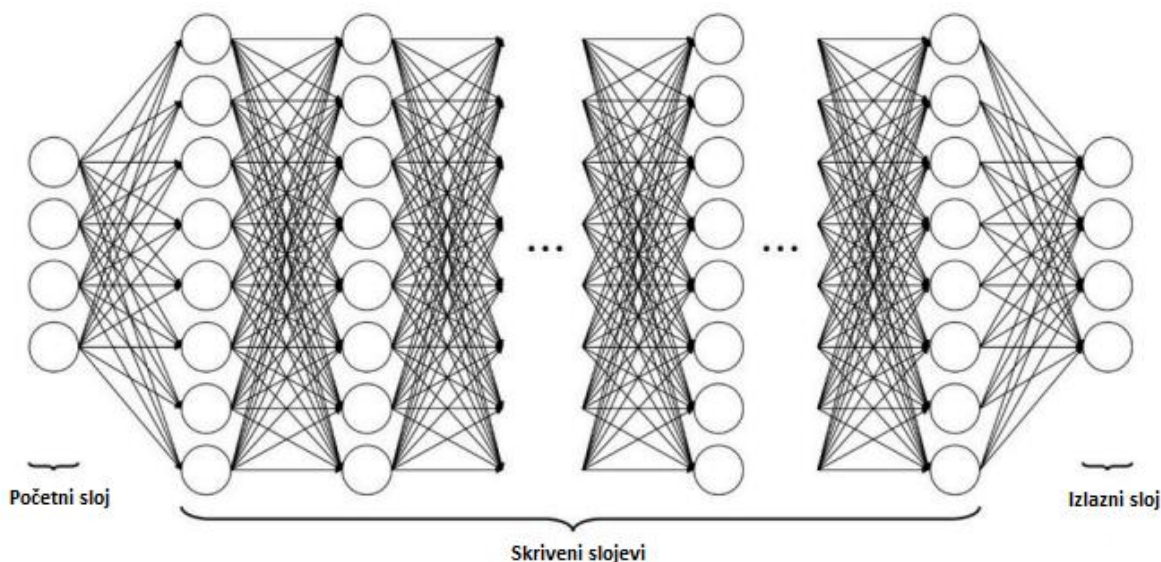
Slika 27. Princip rada kobota [41]

Slika 27 prikazuje pojednostavljeni princip rada kobota. Kobot na temelju analize slike i zvuka, predviđanja namjere radnika te proučavanja okoline donosi odluku treba li radniku pomoći u obavljanju radnog zadatka.

Čak i asistiranje u jednostavnim zadacima je kompleksno za kobota s obzirom da radnik svjesno i nesvjesno donosi mnoge odluke prije obavljanja zadatka asistiranja drugom radniku. Radnik

će procijeniti treba li mu pomoć, procijeniti rizik u pružanju pomoći i tek onda pristupiti i pružiti pomoć. S obzirom da će koboti surađivati sa radnicima u prisutnosti drugih radnika i strojeva, trebaju imati slične mehanizme za donošenje odluka, a to zahtijeva sposobnost percepcije, orijentacije i vizualnog predočavanja prostora. Napredci u područjima dubokog i strojnog učenja će značajno doprinijeti ostvarenju prethodno navedenih sposobnosti kobota.

Metode dubokog učenja su pokazuju obećavajuće sposobnosti u području robotike i računalnog vida. Te metode omogućuju robotima i inteligentnim strojevima sposobnosti poput vizualizacije i pouzdane spoznaje što je neophodno u autonomnim primjenama, uključujući kobote [41]. Slika 28. prikazuje primjer neuronske mreže s više slojeva, tzv. duboka neuronska mreža (*eng. deep neural network*). Glavna karakteristika ovakve mreže jest bolja učinkovitost i izvedba što je više podataka zabilježeno u njima što je prednost u odnosu na tradicionalne metode učenja gdje je situacija obrnuta.



Slika 28. Primjer duboke neuronske mreže [41]

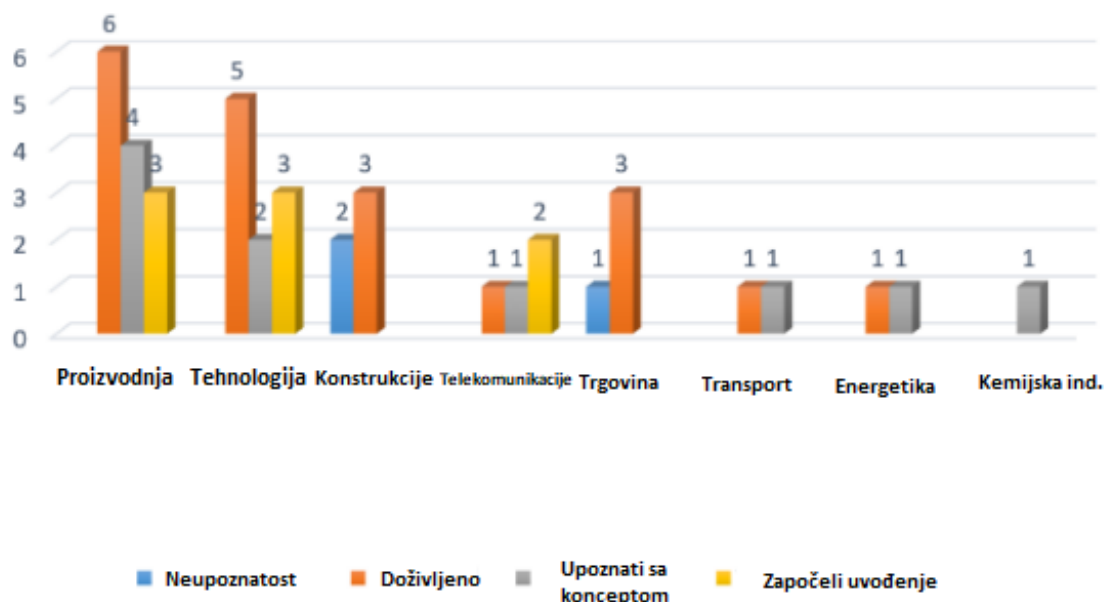
4.5. Spremnost na Industriju 5.0

2022. godine provedeno je istraživanje u Slovačkoj s ciljem utvrđivanja upoznatosti i uvođenja Industrije 5.0 u svoje poduzeće [66]. Istraživanje je uključivalo 39 poduzeća raznih veličina i područja djelovanja prikazanih u tablici ispod.

Tablica 5. Broj intervjuiranih poduzeća po vrsti industrije [66]

Vrsta Industrije	Broj poduzeća
Proizvodnja	12
Tehnologija	10
Konstrukcije	5
Telekomunikacije	4

Trgovina	3
Transport/logistika	2
Energetika	2
Kemijska industrija	1



Slika 29. Spremnost na Industriju 5.0 [66]

Slika 29 prikazuje rezultate istraživanja. Lako se može uočiti da tri industrije koje već provode Industriju 5.0 u svome poduzeću su tehnologije, proizvodnja i telekomunikacije. Industrije poput konstrukcija, trgovine, kemijske industrije i transporta nisu čuli za Industriju 5.0 ili su ju samo doživjeli.

Ovo istraživanje pokazuje da neke industrije stvaraju svoje vizije i ciljeve povezane s Industrijom 5.0. S druge strane, postoje industrije poput kemijske industrije i energetike koje imaju druge prioritete i imaju problema s najnovijim trendovima i prilagodbom na Industriju 5.0. Zabrinjavajuća može biti činjenica da još uvijek poneke industrije ne gledaju unaprijed ka inovacijama te su još u početnoj fazi digitalizacije. Poduzeća moraju shvatiti da zagarantiran uspjeh dolazi kada poduzeća uvode inovacije u svoje procese, sposobne su odgovoriti na tržišne promjene i pružiti kvalitetan proizvod ili uslugu prema zahtjevima kupca [66].

4.6. SWOT analiza Industrije 5.0

U nastavku teksta prikazana je tablica sa snagama, slabostima, prilikama i prijetnjama povezanim s Industrijom 5.0.

Tablica 6. SWOT analiza Industrije 5.0 [44]

<p><u>SNAGE</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Visoka razina otpornosti i fleksibilnost proizvodnje • Suradnja čovjeka i stroja • Razvoj suradničke inteligencije • Zaštita okoliša („zelena proizvodnja“) • Energetska učinkovitost u proizvodnji i potrošnji 	<p><u>SLABOSTI</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Ograničenja u pogledu proizvodnje, potrošnje i znanstvenih istraživanja • Visoka cijena implementacije ekoloških rješenja • Pogoršanje regionalnih razlika u vezi s ekonomskim razvojem u kontekstu nejednakog pristupa održivih resursa • Izazivanje osjećaja krize u društvu
INDUSTRIJA 5.0	
<p><u>PRILIKE</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Razvoj novih strategija za implementaciju digitalnih tehnologija • Smanjenje potrošnje energije i materijala • Velika primjena recikliranja i ponovne upotrebe 	<p><u>PRIJETNJE</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Prijetnja osnovnim ljudskim pravima • Neravnoteža u odnosu čovjeka i strojeva u korist strojeva (umjetna inteligencija) • Prenaglašena potrošnja energije izazvana novim primjenama

SWOT analizom se došlo do sljedećih zaključaka. Industrija 5.0 sa sobom donosi značajne snage uključujući visoku razinu otpornosti i fleksibilnosti proizvodnje, suradnju između čovjeka i strojeva sa snažnim naglaskom na zaštiti okoliša i energetske učinkovitosti. Unatoč tim snagama, postoje i slabosti poput visoke cijene implementacije ekoloških rješenja i pogoršanje regionalnih razlika koje također može biti izazovno u kontekstu nejednakog pristupa održivim resursima. Postoje prilike koje mogu poticati ekološku održivost i ekonomske dobitke poput razvoja novih strategija za implementaciju digitalnih tehnologija i smanjenja potrošnje energije i materijala. Ipak, treba biti svjestan određenih prijetnji koje Industrija 5.0 može predstavljati uključujući prijetnje osnovnim ljudskim pravima te neravnotežu u odnosu čovjeka i strojeva u korist strojeva. Održivi razvoj Industrije 5.0 zahtijeva pažljivo upravljanje kako bi se postigao optimalan balans između tehnoloških inovacija, ekonomske dobiti i društvene odgovornosti.

4.7. Studije slučaja povezane s konceptom Industrije 5.0

U nastavku će biti predstavljene dvije studije slučaja povezane sa konceptom Industrije 5.0.

4.7.1. Razvoj pametne radionice s naglaskom na poboljšanje sigurnosti [67]

Praktična primjena Industrije 5.0 i tehnologija povezanih s njom vidljiva je u primjeru razvoja pametne radionice koja se bavi održavanjem i preradom cijevi u kojoj se želi poboljšati sigurnost zaposlenika primjenom Interneta stvari, senzora i umjetne inteligencije. Za početak ćemo opisati trenutni postupak održavanja i prerade cijevi:

1. Neobrađene cijevi se pohranjuju u području prijema nakon čega ih radnici prikupljaju po potrebi. Ako cijevi stignu sa prljavštinom, tada se prije pohrane šalju u područje čišćenja. Operateri moraju ostati udaljeni od područja čišćenja zbog prisutnosti opasnih kemijskih proizvoda i vruće vode.



Slika 30. Područje prijema i čišćenja [67]

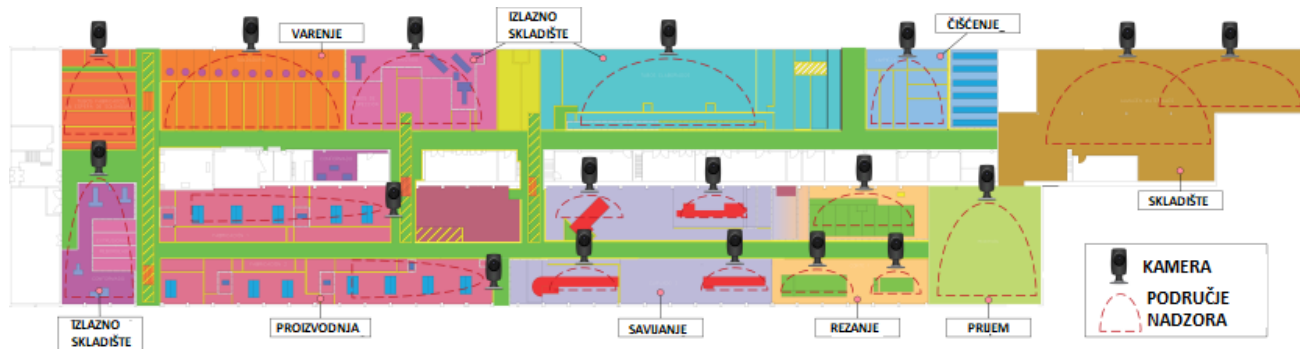
2. Svaka cijev se prvo reže u području rezanja prema potrebnim dimenzijama. Za rezanje se koriste snažne mehaničke pile. Cijevi se premještaju s područja prijema na područje rezanja tako što se slažu na palete koje nose veliki portalni sustavi instalirani stropu radionice.



Slika 31. Područje rezanja [67]

3. Cijevi se savijaju na za to predviđenom mjestu pomoću strojeva za savijanje. Radnici moraju koristiti zaštitnu opremu poput zaštitnih naočala te držati dovoljan razmak od stroja
4. Cijevi se pomiču u područje proizvodnje gdje se vrše razne modifikacije, npr. varenje ventila na cijev i slično. Tijekom varenja potrebno je poduzeti sigurnosne mjere.
5. Na kraju se cijevi slažu na palete, pakiraju i otpremaju na skladišna mjesta

Slika 32. prikazuje koncept pametne radionice. Na njoj su prikazana prethodno opisana područja radionice kroz koje prolaze cijevi, od zaprimanja pa sve do skladištenja. Također se može uočiti 18 kamera koje nadziru prisutnost radnika 24 sata dnevno, 7 dana u tjednu.



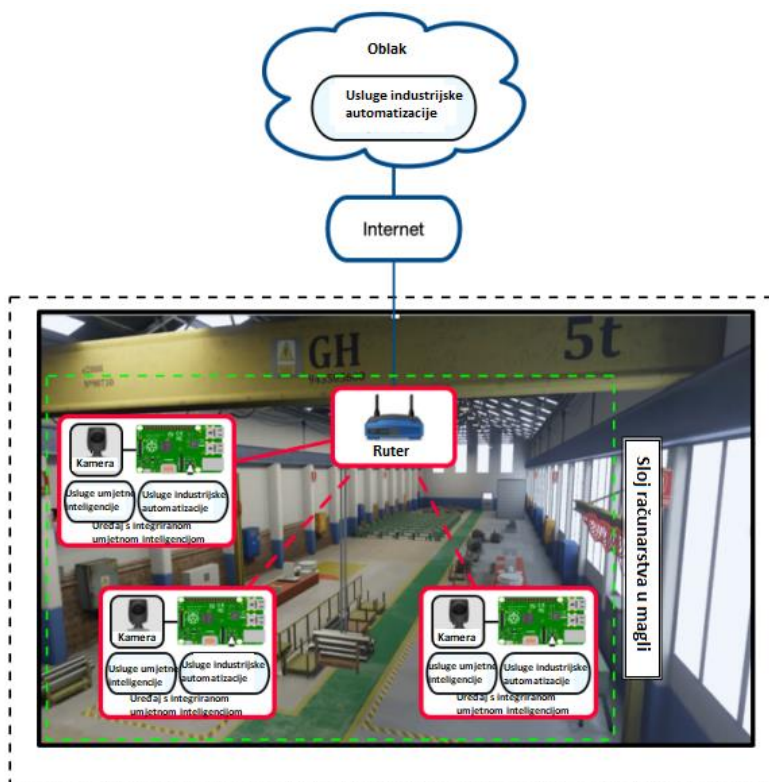
Slika 32. Tlocrt radionice s implementiranim kamerama [67]

Cilj predloženog rješenja je iskoristiti sposobnost detekcije pokreta, tj. detekcija radnika uz pomoć kamere koje surađuju s Internetom stvari i umjetnom inteligencijom kako bi „zaključali“ ili „otključali“ strojeve i uređaje u određenoj prostoriji te automatizirali dostupne sigurnosne mehanizme. Na primjer, roboti ili strojevi za rezanje mogu ugroziti radnika tijekom njihova rada ukoliko se ne poštuje sigurnosna udaljenost. Upotrebom kamera zadatak je ispuniti 2 cilja:

- Povećana sigurnost – automatsko otkrivanje ljudi u blizini strojeva koji su u pogonu; nakon detekcije slijedi zvučno upozorenje, a ukoliko se nakon zvučnog upozorenja udaljenost između stroja i čovjeka ne poveća potrebno je poslati naredbu za isključenje stroja
- Praćenje operacija – automatsko otkrivanje i praćenje radnika i strojeva te prikupljanje informacija o procesima koje se mogu koristiti za poboljšanje proizvodnih procesa.

Osim istaknutih ciljeva, važno je navedeni sustav utječe i na razne aspekte kružne ekonomije u pogledu:

- Pametnijeg iskorištenja resursa – detekcija prisutnosti operatera omogućuje određivanje kada strojevi trebaju raditi, a kada ih treba isključiti
- Smanjenje ukupnih emisija stakleničkih plinova – inteligentnija upotreba resursa smanjuje potrošnju energije, a time i ugljični otisak
- Povećana sigurnost procesa – detekcija ljudske blizine omogućuje zaštitu od mogućih incidenata ili nesreća s uređajima i strojevima.



Slika 33. Struktura sustava za nadziranje [67]

Slika 33 prikazuje kako izgleda struktura sustava za nadziranje cijelog postrojenja. Sastoji se od sloja računarstva u magli (eng. *mist computing layer*) koji se odnosi na računarstvo na rubu mreže gdje se obrada podataka odvija bliže izvoru podataka umjesto u centralnom računalnom sustavu i oblaka (eng. *cloud*) koji se bavi zahtjevima uređaja koji spadaju u *mist computing layer* i koji se ne mogu obraditi lokalno.

Kao što je ranije spomenuto, jedan od aspekata cirkularne ekonomije kojeg treba smanjiti jest potrošnja energije, a to automatski utječe na smanjenje ugljičnog otiska. Zato je proveden proračun koji ukazuje koliko se energije potroši na godišnjoj bazi ako se koristi model rada nadzornih kamera naveden maloprije. Izračunom je utvrđeno da jedna kamera koja radi na VWW modelu (detekcija osobe) godišnje potroši 0,353 kWh. Kada se uzme u obzir da postoji 18 instaliranih kamera ukupna godišnja potrošnja iznosi 6,354 kWh za VWW model što nije veliki iznos potrošene energije i lako ga se može pokriti korištenjem nekog od oblika obnovljivih izvora energije poput fotonaponskih panela.

4.7.2. Integracija kobota u proizvodnu liniju u obliku slova U [68]

Ova studija slučaja predstavlja stanje u proizvodnji prije i nakon uvođenja kobota u proizvodnu liniju. Tvrtka, čija proizvodna linija je predmet ovog istraživanja, se bavi proizvodnjom komponenata za automobilsku industriju. Proizvodi se sastoje od plastičnog tijela, sastavljenog od 3 zavarena dijela, spojenog sa filtrirajućim elementom. Brojni dodatni dijelovi, kupljeni od vanjskih dobavljača, također se montiraju na tijelo.

Početna faza: U početku su se proizvodi proizvodili na poluautomatskoj standardnoj proizvodnoj liniji. Postrojenje je uključivalo robota kojeg je opskrbljivao konvejer te su se pored toga nalazila 2 mjesta za obavljanje manualnog rada. Linija je bila direktno povezana s 2 stroja za injekcijsko prešanje pomoću konvejera. Prikaz opisanog postrojenja prikazan je na slici ispod.

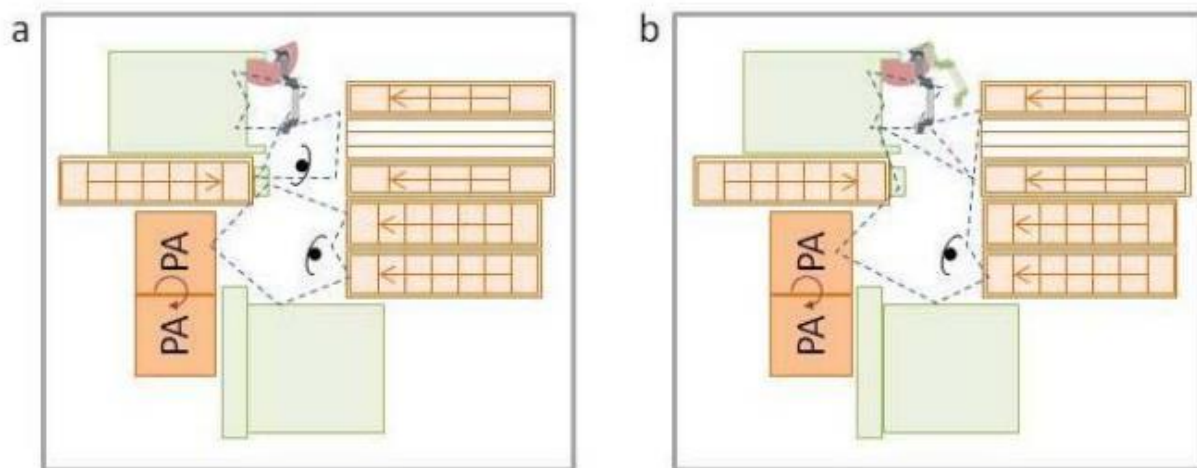


Slika 34. Tlocrt poluautomatske proizvodne linije [68]

Središnja faza: Projekt transformacije prema principima vitke (eng. *lean*) proizvodnje postavio je zahtjeve za većom fleksibilnošću i prilagodljivosti pa su stoga ručne operacije odvojene od strojeva za injekcijsko prešanje. Zbog karakteristika proizvoda, linija je redizajnirana u obliku slova U. Zbog nove konfiguracije, uvođenje tradicionalnog robota u radni prostor više nije moguće, te je proizvodna linija izgubila tu stavku proizvodnje.

Završna faza: Zbog potrebnog poboljšanja produktivnosti analizirane su nove opcije fleksibilne automatizacije. Istražene su nove mogućnosti koje nude koboti te je dogovorena integracija kobota u proizvodnu liniju u obliku slova U.

Donja slika prikazuje dvije moguće izvedbe proizvodne linije sa kobotom, na lijevoj slici su 2 operatora uključena u proizvodni proces dok je na desnoj slici samo jedan operator dio proizvodne linije.



Slika 35. Proizvodna linija s integriranim kobotom [68]

Kako bismo dobili jasniju sliku iz perspektive učinkovitosti bilo je potrebno provesti mjerenja učinkovitosti svakog rješenja tijekom vremena. Definirani KPI-jevi usklađeni su s ciljevima projekta transformacije te su izmjereni za svako rješenje.

KPI-jevi definirani za mjerenje učinkovitosti različitih rješenja su:

- Produktivnost rada – broj ispravnih jedinica proizvoda podijeljenih sa satom rada [jedinica/sat/operateru]
- Površina – ukupna površina zauzeta operaterima, strojevima i materijalima [m^2]
- Produktivnost površine – kapacitet podijeljen s površinom proizvodnje [jedinica/sat/ m^2]

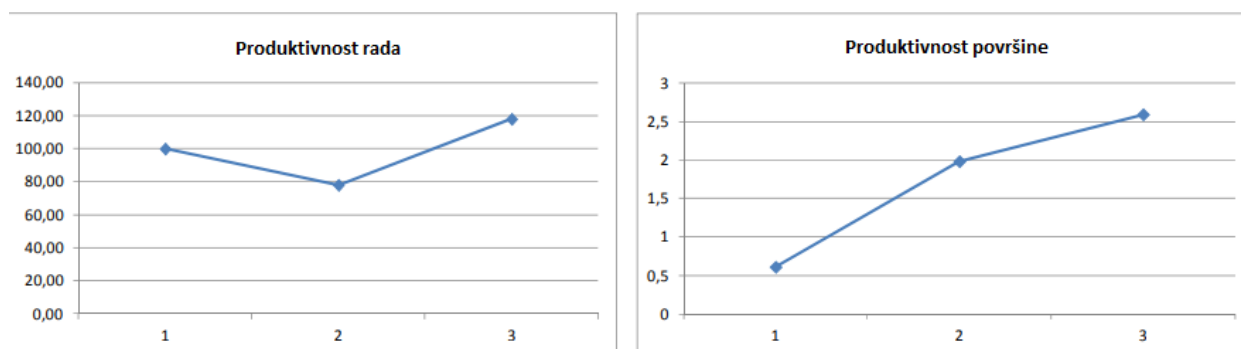
Tablica 7. Rezultati mjerenja [68]

KPI	Početna faza	Središnja faza	Završna faza
Produktivnost rada [u/h/o]	100	78	118
Površina [m^2]	170	45	45
Produktivnost površine [u/h/ m^2]	0,61	1,98	2,59

Tablica 7. pokazuje da se produktivnost rada smanjila za 22% kada se proizvodna linija transformirala u proizvodnu liniju u obliku slova U i uklonila robota iz proizvodnje. Uvođenjem kobota, produktivnost rada je porasla za 18% u odnosu na početnu fazu. Zahtjevi za površinom smanjili su se sa $170 m^2$ na $45 m^2$ između početne i središnje faze. U završnoj fazi nije bilo nikakvih promjena u površini što znači da integracija kobota ne zahtijeva povećanje površine. Produktivnost površine povećala se za 225% zbog linije u obliku slova U. Iako nije utjecalo na

zahtjeve površine, integracija kobota povećala je produktivnost površine zbog većeg kapaciteta.

U nastavku su prikazana 2 grafa koji pokazuju kako se produktivnost rada i površine mijenjala kroz faze.



Slika 36. Prikaz promjene produktivnosti rada i površine kroz faze [68]

5. USPOREDBA KONCEPATA INDUSTRIJE 4.0 I INDUSTRIJE 5.0

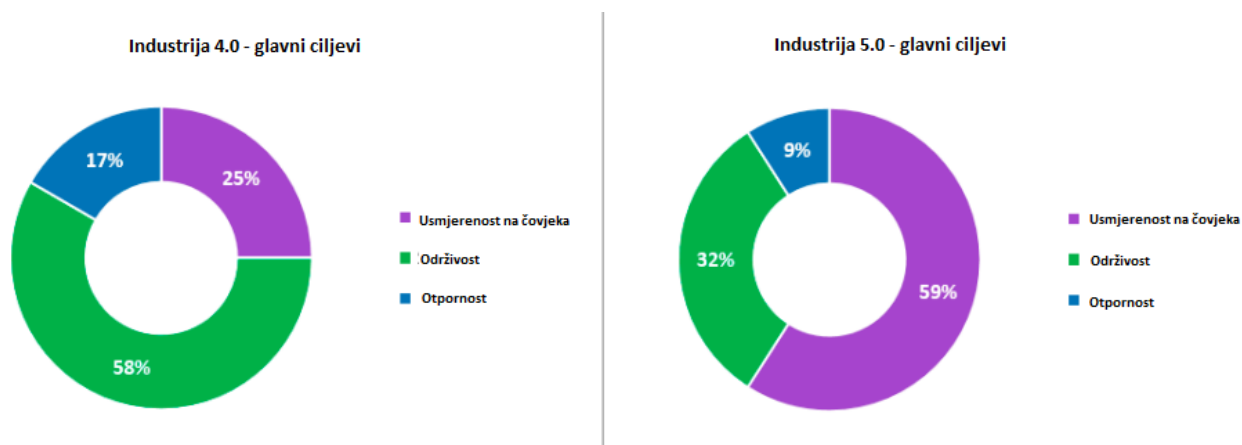
S obzirom da su u prethodnim poglavljima detaljno predstavljene značajke obaju industrija, lako ih je moguće usporediti i dokučiti po čemu su slične, a po kojim značajkama se razlikuju jedna od druge. Ovo poglavlje biti će podijeljeno u dva dijela, u prvom dijelu sagledat će se značajke koje su zajedničke obama industrija dok će u drugom dijelu naglasak biti na njihovoj raznolikosti.

Sličnosti Industrije 4.0 i Industrije 5.0

Proučavajući tehnologije i trendove povezane sa oba koncepta, može se zaključiti da Industrija 4.0 i Industrija 5.0 često dijele temeljne ciljeve unapređenja proizvodnje kroz integraciju tehnologija i inovacija u svim aspektima od proizvodnje, planiranja, logistike pa sve do prodaje sve sa ciljem povećanja produktivnosti i učinkovitosti. Prva zajednička značajka bila bi tehnološki fokus. Oba koncepta koriste napredne tehnologije poput Interneta stvari, umjetne inteligencije, analitike podataka, robotike i još mnoge druge sve s ciljem poboljšanja industrijskih procesa. Sljedeća zajednička značajka je svakako povezanost, oba koncepta promiču povezanost između dijelova proizvodnje kako bi se omogućila bolja komunikacija, koordinacija i prikupljanje podataka. Nadalje, obje industrije teže prema potpunoj digitalizaciji proizvodnih procesa, a to uključuje upotrebu digitalnih tehnologija za praćenje, upravljanje i optimizaciju proizvodnje. Uloga inovacija u proizvodnji još je jedna zajednička značajka oba koncepta. Bilo da se radi o automatizaciji, pametnim strojevima ili personaliziranim rješenjima, oba koncepta podupiru uvođenje inovacija. I Industrija 4.0 i Industrija 5.0 su otvorene ka promjenama, prepoznaju dinamičnost tržišta i potrebu za prilagodbom promjenama te su otvoreni za nove metode rada kako bi se bolje nosili s izazovima. Povećana sigurnost radnika, radnih mjesta i povjerljivih podataka svakako je pri vrhu liste prioriteta za oba koncepta. Korištenjem pametnih senzora, analizom rizika i sigurnosnih sustava žele se spriječiti moguće nezgode na radnom mjestu. Svakako na umu treba imati i sigurnost povjerljivih podataka koji mogu biti izloženi hakerskim napadima ako ih se ne zaštiti na ispravan način. Smanjenje operativnih troškova kroz efikasnije korištenje resursa i smanjenje gubitaka u proizvodnji svakako je karakteristično za oba koncepta. Uovoljavanje željama kupaca još je jedna stavka kojoj teže oba koncepta iako je u Industriji 5.0 ta personalizacija otišla jedan korak dalje. Na posljetku, ali svakako nimalo manje bitno je poboljšanje učinkovitosti, proizvodni procesi se žele učiniti što učinkovitijima, želi se povećati produktivnost te optimizirati kvaliteta i isporuka proizvoda kupcima.

Razlike Industrije 4.0 i Industrije 5.0

Iako možda na prvu ne djeluju toliko različite, Industrija 4.0 i Industrija 5.0 se ne baziraju na identičnim ideologijama. Kao što je objašnjeno u poglavlju 4.2., tri glavna značajke na kojima počiva Industrija 5.0 su održivost, otpornost i usmjerenost na čovjeka i upravo tu su glavne razlike u odnosu na Industriju 4.0. Provedeno je istraživanje kojemu je cilj bio utvrditi koja područja Industrije 4.0 i Industrije 5.0 znanstvenici smatraju potencijalnim za istraživanje [5]. Na osnovu tih interesa i rezultata može se zaključiti koje su razlike i koji je fokus djelovanja tih dviju industrija.



Slika 37. Ciljevi istraživanja povezani sa ključnim značajkama Industrije 5.0 [5]

Na temelju gore prikazanih grafova jasno se može uočiti kako je Industrija 5.0 puno više fokusirana na čovjeka i na njegovo vraćanje u centar proizvodnog procesa. Industrija 4.0 usmjerena je na potpuno automatiziranje procesa i smanjenje ljudske interakcija dok je potpuno drugačija priča kod Industrije 5.0 koja promiče suradnju između ljudi i tehnologije. Kada je već u pitanju automatizacija svakako valja spomenuti i autonomne sustave koji bi, prema Industriji 4.0, mogli samostalno donositi odluke bez ljudske interakcije. Industrija 5.0 ima drugačiji pogled na ovu situaciju. Zalaže se za suradnju čovjeka i strojeva te smatra kako ljudi igraju važnu ulogu u radu s tehnologijom kako bi zajedno obavljali zadatke. S obzirom da Industrija 4.0 nije usmjerena toliko na čovjeka koliko na potpunu digitalizaciju, jasno je da želi smanjiti ovisnost o radnoj snazi dok je kod Industrije 5.0 totalno suprotna priča. Iako je Industrija 4.0 sa sobom donijela značajne tehnološke napretke, Industrija 5.0 nam pokazuje da tehnologija sama po sebi nije odgovor za sve. Oba koncepta zagovaraju korištenje novih tehnologija poput Interneta stvari, umjetne inteligencije, strojnog učenja, ali na drugačije načine. Industrija 4.0 želi navedene tehnologije uklopiti u autonomne sustave, a Industrija 5.0 želi provesti integraciju tehnologija s vještinama i kreativnošću ljudi kako bi skupa radili na optimiziranju procesa. Zbog potpune digitalizacije i zagovaranja autonomnih strojeva, Industrija 4.0 izazvala je kod ljudi

strah od gubitka poslova, ali taj problem je riješen vraćanjem čovjeka u procese gdje ljudi više ne moraju bojati da će im robot preuzet radno mjesto već sada rade skupa na rješavanju problema. Dapače, integracijom kobotu u proizvodne procese predviđa se nastanak novih radnih mjesta poput *Chief Robotics Officer*. Kada govorimo o održivosti, Industrija 4.0 nije uvijek doživljavala održivost kao glavni fokus iako se tehnologije poput pametnih senzora, Interneta stvari i analitike podataka mogu koristiti za poboljšanje energetske učinkovitosti i smanjenje otpada. S druge strane, Industrija 5.0 ističe odgovornost prema društvu i okolišu. Smanjenje potrošnje energije, smanjenje emisije stakleničkih plinova, recikliranje i još mnogo toga je ključan element poslovnih strategija Industrije 5.0. Govoreći o tvornicama i proizvodnim postrojenjima, Industrija 4.0 zagovara pametne tvornice sa mogućnošću samooptimizacije proizvodnih procesa dok Industrija 5.0 više fokusira na razvoj integriranih, fleksibilnih proizvodnih sustava koji se prilagođavaju zahtjevima kupaca i tržišnim trendovima. Na osnovu svega rečenog, može se zaključiti kako Industrija 4.0 ima cilj postići potpunu digitalnu transformaciju i povećati učinkovitost kroz automatizaciju dok Industrija 5.0 kao glavni cilj vidi postizanje uravnoteženog sustava gdje ljudi i tehnologija zajedno rade na poboljšanju proizvodnje imajući na umu smanjenje utjecaja na okoliš.

Tablica 8. Razlike Industrije 4.0 i Industrije 5.0 [66]

ZNAČAJKE	INDUSTRIJA 4.0	INDUSTRIJA 5.0
Fokus	Automatizacija i upotreba tehnologija za poboljšanje učinkovitosti u proizvodnji	Stvoriti održiv, ekološki prihvatljiv proizvodni proces
Naglasak	Upotreba podatka i analitike za optimizaciju procesa	Važnost ljudskog faktora i suradnje čovjeka i strojeva
Tehnologije	Internet stvari, strojno učenje, umjetna inteligencija u autonomnim sustavima	Kombinacija tehnologija sa ljudskim vještinama i kreativnosti
Tvornice	Pametne tvornice s mogućnosti samooptimizacije proizvodnih procesa	Integrirani, fleksibilni proizvodni sustavi za prilagodbu zahtjevima kupaca i tržišnim trendovima

Učinkovitost	Prediktivno održavanje, analiza podataka u stvarnom vremenu za poboljšanje učinkovitosti i smanjenje troškova	Prioritizacija održivih proizvodnih praksi s ciljem minimizacije otpada i smanjenje negativnog utjecaja na okoliš
--------------	---	---

6. ZAKLJUČAK

Inovacije u tehnologiji su nezaustavljive, brze i traže konstantnu potrebu za stalnim unaprjeđenjem i učenjem. Od teškog i fizičkog rada u Industriji 1.0, čovjek je svojim znanjem i potrebom za što produktivnijim radom napredovao do suradnje između čovjeka i robota. Cilj ovog rada bio je pobliže opisati koncepte Industrije 4.0 i Industrije 5.0 te na temelju njihove usporedbe pokušati dati odgovor na pitanje koje se iznova ponavlja „Je li Industrija 5.0 odgovor na Industriju 4.0 ili njen nastavak?“, ali odgovor na to pitanje nije toliko jednostavan.

Industrija 4.0 već odavno nije pojam koji se zasniva na predviđanjima nego je zaživjela u mnogim tvrtkama diljem svijeta. Da bi implementacija Industrije 4.0 bila moguća potrebno je ispuniti neke preduvjete poput umreženosti, digitalne povezanosti, kvalificirane radne snage itd. Radno okruženje Industrije 4.0 okarakterizirano je integriranim i naprednim proizvodnim tehnologijama koje omogućuju praćenje svih proizvodnih procesa i međusobnu komunikaciju sustava s ciljem stvaranja autonomnih sustava bez prisustva čovjeka. Uloga postojećih radnika rijetko se spominje kada je riječ o autonomnim sustavima. Broj radnika značajno se smanjuje, a i struktura zaposlenika se mijenja, traže se nova znanja prije svega iz područja programiranja i robotike.

S druge strane, Industrija 5.0 nastoji vratiti čovjeka natrag u proizvodne procese te time rješava problematiku povezanu s konceptom Industrije 4.0. Ljudi će uvijek biti glavni pokretači aktivnosti u proizvodnom sustavu. Ljudi koji stvaraju i upravljaju proizvodnim sustavima trebaju podršku u pripremi infrastrukture i resursa za uvođenje novih tehnologija. Ulažu se naponi u stvaranje kolaboracijskih robota koji mogu surađivati s ljudima. Međutim, treba svakako imati na umu utjecaj na održivost i otpornost procesa što su ključne vrijednosti Industrije 5.0 uz već spomenutu usmjerenost na čovjeka. S jedne strane postoje organizacijski, društveni i ergonomski aspekti gdje tehnologija treba biti na raspolaganju ljudima, a s druge strane postoji smanjenje potrošnje energije radi zadovoljenja ekoloških aspekata. Dakle, može se reći da je ključni aspekt ravnoteža između svih bitnih segmenata, ali je uvijek čovjek u središtu procesa.

Industrija 4.0 je koncept sadašnjosti i budućnosti, ali nosi određene izazove kada je u pitanju pozicija radnika u proizvodnom procesu. Industrija 5.0 koristi sve tehnologije karakteristične za Industriju 4.0, ali s bitnom razlikom, ne zanemaruje poziciju radnika u proizvodnom procesu. Dakle, može se zaključiti da je Industrija 4.0 koncept vođen tehnologijom, dok je Industrija 5.0 koncept vođen vrijednostima poput održivosti i otpornosti. Prva treba drugu kako bi ju

podsjetila na osnovne društvene potrebe, vrijednosti i odgovornosti kao krajnje ciljeve, a druga treba prvu za tehnološke poticaje i rješenja.

LITERATURA

- [1] Nikolić, G., Je li industrija 5.0 odgovor na industriju 4.0 ili njen nastavak? *Politehnika I Dizajn*, 2018.
- [2] Trstenjak, Maja, et al. "Integrated Multilevel Production Planning Solution According to Industry 5.0 Principles." *Applied Sciences* 14.1, 2023
- [3] Clim, Antonio - Cyber security beyond the Industry 4.0 era. A short review on a few technological promises, 2019.
- [4] D. Gorecky, M. Schmitt, M. Loskyll and D. Zühlke, "Human-machine-interaction in the industry 4.0 era," Porto Alegre, Brazil, 2014
- [5] Zizic, M.C.; Mladineo, M.; Gjeldum, N.; Celent, L. From Industry 4.0 towards Industry 5.0: A Review and Analysis of Paradigm Shift for the People, Organization and Technology. *Energies* 2022
- [6] Prof. Dr. Henning Kagermann, Prof. Dr. Wolfgang Wahlster, Dr Johannes Helbig;, „Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0“, Heilmeyer und Sernau Gestaltung, 2013.
- [7] Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., and Hoffmann, M. “Industrie 4.0”. *Wirtschaftsinformatik*, 2014.
- [8] Oztemel, E., and Gursev, S. “Literature review of Industry 4.0 and related technologies”. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020.
- [9] Longo, F., Nicoletti, L., and Padovano, A. “Ubiquitous knowledge empowers the smart factory: The impacts of a service-oriented digital twin on enterprises performance”, 2019.
- [10] Longo, F., Nicoletti, L., and Padovano, A. “Smart operators in industry 4.0: A human-centered approach to enhance operators’ capabilities and competencies within the new smart factory context”, 2017
- [11] <https://www.calsoft.com/what-is-industry-4-0/> (pristupljeno: 06.01.2024.)
- [12] Atzori, Luigi & Iera, Antonio & Morabito, Giacomo. *The Internet of Things: A Survey*, 2010
- [13] <https://sdllcorp.com/post/iot-applications-and-benefits-in-manufacturing/> (pristupljeno: 07.01.2024.)
- [14] Hozdić E., Žapčević S., Butala P. „Kibernetско – fizičke strukture za nove autonomne radne sisteme“, Ljubljana, 2015.

- [15] Soori, Mohsen & Arezoo, Behrooz & Dastres, Roza. Internet of Things for Smart Factories in Industry 4.0, A Review, 2023.
- [16] Berger R. , Think act- Industry 4.0, 2014.
- [17] [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS_BRI\(2015\)568337_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS_BRI(2015)568337_EN.pdf) (pristupljeno: 07.01.2024.)
- [18] Sniderman B., Mahto M., Cotteleer M. J. "Industry 4.0 and manufacturing ecosystems" 2016.
- [19] https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/570007/IPOL_STU%282016%29570007_EN.pdf (pristupljeno: 09.01.2023.)
- [20] Perić E., Hrvatska gospodarska komora "Industrija 4.0" <https://www.hgk.hr/documents/hgk-industrija-4058d8c59722f1e.pdf>
- [21] Sony M., Pros and cons of implementing Industry 4.0 for the organizations: a review and synthesis of evidence, Production & Manufacturing Research (2020)
- [22] C. H. Li and H. K. Lau, "A critical review of product safety in industry 4.0 applications," 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Singapore, 2017
- [23] Blackburn M., Alexander J., Legan J. D. & Klabjan D., „Big Data and the Future of R&D Management“, Research-Technology Management, 2017.
- [24] MacDougall W., Industrie 4.0: Smart manufacturing for the future. Germany Trade & Invest, 2014.
- [25] Peukert, B., Benecke, S., Clavell, J., Neugebauer, S., Nissen, N. F., Uhlmann, E., Lang, K.-D., & Finkbeiner, M., Addressing sustainability and flexibility in manufacturing via smart modular machine tool frames to support sustainable value creation, 2015.
- [26] Carvalho A. M., Sampaio, P., Rebentisch, E., & Saraiva, P. „Operational excellence as a means to achieve an enduring capacity to change—revision and evolution of a conceptual model“, Procedia Manufacturing, 2017.
- [27] Davies R., Coole, T., & Smith, A., „Review of socio-technical considerations to ensure successful implementation of Industry 4.0“, 2017.
- [28] Müller, J., & Voigt, K. I., „Industry 4.0—integration strategies for small and medium-sized enterprises“, Vienna, Austria, 2017.
- [29] Hirsch-Kreinsen, H. Smart production systems. A new type of industrial process innovation. Copenhagen, 2014.

- [30] Müller, J. M., Kiel, D., & Voigt, K.-I. What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability*, 2018.
- [31] Trstenjak M., Cajner H., Opetuk T. "Industry 4.0 Readiness Factor Calculation: Criteria Evaluation Framework." 2019.
- [32] <https://www.industrie40-readiness.de/?lang=en> (pristupljeno 11.01.2024.)
- [33] Schumacher A., Erol S., Sihn W. A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. 2016.
- [34] Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P.D., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M.J. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries, 2016.
- [35] Siemens PLC Industry 4.0
<https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc.html>
(pristupljeno: 14.01.2024.)
- [36] Rexroth Bosch Group-Industry 4.0
<https://www.boschrexroth.com/en/xc/trends-and-topics/industry-4-0/best-practices/your-benefits-81> (pristupljeno: 14.01.2024.)
- [37] Wiktorsson, M., Noh, S.D., Bellgran, M., & Hanson, L. Smart Factories: South Korean and Swedish examples on manufacturing settings. 2018.
- [38] <https://matics.live/case-studies/jolybar-improves-productivity-and-reduces-reaction-times-to-meet-deadlines-with-matics/> (pristupljeno: 22.01.2024)
- [39] Zoubek M., Šimon M. Industry 4.0: A case study of industrial company transformation into Smart Factory with an accent on internal logistics and production. 2020.
- [40] Romero D., Bernus P., Noran O., Stahre J., Fast-Berglund Å. The operator 4.0: Human cyber-physical systems & adaptive automation towards human-automation symbiosis work systems. 2016.
- [41] Nahavandi S. Industry 5.0—A Human-Centric Solution. *Sustainability*. 2019.
- [42] Özdemir, V., & Hekim, N. Birth of Industry 5.0: Making sense of big data with artificial intelligence, "the internet of things" and next-generation technology policy. *Omics: A Journal of Integrative Biology*. 2018.
- [43] Huang, S., Wang, B., Li, X., Zheng, P., Mourtzis, D., & Wang, L. Industry 5.0 and Society 5.0—Comparison, complementation and co-evolution. 2022.

- [44] European Commission. Directorate-General for Research and Innovation, Breque M., De Nul L., Petridis A., Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. 2021.
- [45] Doyle-Kent M., Kopacek P., Adoption of Collaborative Robotics in Industry 5.0. An Irish industry case study, 2021.
- [46] Rada M.: INDUSTRY 5.0 - from virtual to physical. 2015.
- [47] Østergaard H.E.: WELCOME TO INDUSTRY 5.0. 2017.
- [48] Østergaard H.E.: Industry 5.0 – Return of the human touch. 2016.
- [49] Adel, A. Future of industry 5.0 in society: human-centric solutions, challenges and prospective research areas. 2022.
- [50] Golovianko M., Terziyan, V., Branytskyi V., Malyk D. "Industry 4.0 vs. Industry 5.0: Co-existence, Transition, or a Hybrid?" 2023.
- [51] Zizic, M. C., Mladineo, M., Gjeldum, N., and Celent, L. "From Industry 4.0 towards Industry 5.0: a review and analysis of paradigm shift for the people, organization and technology". 2022
- [52] Saniuk, S., Grabowska, S., and Straka, M. "Identification of social and economic expectations: contextual reasons for the transformation process of Industry 4.0 into the Industry 5.0 concept. 2022.
- [53] Moraru, G. M., and Popa, D. "Potential resistance of employees to change in the transition to Industry 5.0" 2021.
- [54] Mladineo M., Cubić M., Gjeldum N., Crnjac Žižić M. Human-Centric Approach of the Lean Management as an Enabler of Industry 5.0 in SMEs. Split, Croatia, 2021.
- [55] <https://cordis.europa.eu/project/id/723277> (pristupljeno 17.01.2024)
- [56] <https://www.slideshare.net/Factory2FitEU/factory2fit-presentation-design-and-evaluation-framework-of-solutions-that-support-work-wellbeing>(pristupljeno:17.01.2024.)
- [57] Ruppert T., Jaskó S., Holczinger T., Abonyi J. "Enabling Technologies for Operator 4.0: A Survey." 2018.
- [58] Hashimoto H. "Intelligent space: Interaction and intelligence. Artificial Life and Robotics"

- [59] Evans S., Vladimirova D., Holgado M., van Fossen K., Yang M., Silva, E.A., Barlow C.Y. Business Model Innovation for Sustainability: Towards a Unified Perspective for Creation of Sustainable Business Models. 2017.
- [60] Kishor Kumar Reddy C., Anisha P.R., Khan S., Mohd Hanafiah M., Pamulaparty L., Madana Mohana R. Sustainability in Industry 5.0: Theory and Applications. 2024.
- [61] Hidayatno A., Destyanto A.R., Hulu C.A. Industry 4.0 Technology Implementation Impact to Industrial Sustainable Energy in Indonesia: A Model Conceptualization. 2019.
- [62] Acquaah M., Amoako-Gyampah K., Jayaram J. Resilience in Family and Nonfamily Firms: An Examination of the Relationships between Manufacturing Strategy, Competitive Strategy and Firm Performance 2011
- [63] Anderies J. M., Folke C., Walker B., and Ostrom E. “Aligning key concepts for global change policy: robustness, resilience, and sustainability”. Ecology and Society, 2013
- [64] Morisse M., Prigge C. Design of a Business Resilience Model for Industry 5.0 Manufacturers. 2017.
- [65] Lengnick-Hall C.A., Beck T.E., Lengnick-Hall M.L. Developing a Capacity for Organizational Resilience through Strategic Human Resource Management. 2011
- [66] Lachvajderova L., Kadarova J. Industry 4.0 Implementation and Industry 5.0 Readiness in Industrial Enterprises. 2022.
- [67] Fraga-Lamas P., Lopes S., Fernández-Caramés T. Green IoT and Edge AI as Key Technological Enablers for a Sustainable Digital Transition towards a Smart Circular Economy: An Industry 5.0 Use Case. 2021.
- [68] Gil Vilda F., Sunyer A., Yagüe-Fabra J., Crespo C., Serrano H. Integration of a collaborative robot in a U-shaped production line: a real case study. 2017.

PRILOZI

I. CD-ROM disk