

UNIVERZA V LJUBLJANI
EKONOMSKA FAKULTETA

ZAKLJUČNA STROKOVNA NALOGA VISOKE POSLOVNE ŠOLE
**UPORABA DIGITALNIH DVOJČKOV V PROIZVODNEM
MANAGEMENTU**

Ljubljana, april 2025

ERIK LEBEN

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Erik Leben, študent Univerze v Ljubljani Ekonomske fakultete, avtor predloženega dela z naslovom Uporaba digitalnih dvojčkov v proizvodnem managementu, pripravljenega v sodelovanju z mentorjem red. prof. dr. Borutom Rusjanom

IZJAVLJAM

1. da sem predloženo delo pripravil samostojno;
2. da je tiskana oblika predloženega dela istovetna njegovi elektronski obliki;
3. da je besedilo predloženega dela jezikovno korektno in tehnično pripravljeno v skladu z Navodili za izdelavo pisnih del UL EF, kar pomeni, da sem poskrbel, da so dela in mnenja drugih avtorjev oziroma avtoric, ki jih uporabljam oziroma navajam v besedilu, citirana oziroma povzeta v skladu z Navodili za izdelavo pisnih del UL EF;
4. da se zavedam, da je plagiatstvo – predstavljanje tujih del (v pisni ali grafični obliki) kot mojih lastnih – kaznivo po Kazenskem zakoniku Republike Slovenije;
5. da se zavedam posledic, ki bi jih na osnovi predloženega dela dokazano plagiatstvo lahko predstavljalo za moj status na Univerzi v Ljubljani Ekonomski fakulteti v skladu z relevantnim pravilnikom;
6. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v predloženem delu in jih v njem jasno označil;
7. da sem pri pripravi predloženega dela ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;
8. da soglašam, da se elektronska oblika predloženega dela uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
9. da na Univerzo v Ljubljani neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve predloženega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja predloženega dela na voljo javnosti na svetovnem spletu prek Repozitorija Univerze v Ljubljani;
10. da hkrati z objavo predloženega dela dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v njem in v tej izjavi;
11. da sem preveril verodostojnost informacij, ki izhajajo iz zapisov na podlagi uporabe orodij umetne inteligence.

V Ljubljani, dne 23.04.2025

Podpis študenta: _____



POVZETEK

Digitalni dvojčki so ključna tehnologija industrije 4.0, ki omogoča povezavo fizičnega in digitalnega sveta prek simulacij in analize podatkov. Naloga obravnava teoretične osnove digitalnih dvojčkov, njihovo arhitekturo, vlogo v proizvodnem managementu ter ključne izzive, kot so visoki stroški, varnost podatkov in integracija. Predstavljeni so tudi trendi prihodnjega razvoja, deljeni na tehnične, aplikacijske, regulativne in etične.

KLJUČNE BESEDE: digitalni dvojčki, industrija 4.0, internet stvari, umetna inteligenca, simulacija, napovedno vzdrževanje, optimizacija proizvodnje, veliki podatki, oblačne storitve, pametna proizvodnja

CILJI TRAJNOSTNEGA RAZVOJA



ABSTRACT

Digital twins are a key technology of Industry 4.0, enabling the connection between the physical and digital worlds through simulations and data analysis. This paper explores the theoretical foundations of digital twins, their architecture, role in production management, and key challenges such as high costs, data security, and system integration. Future development trends are also presented and categorized into technical, application, regulatory, and ethical aspects.

KEY WORDS: digital twins, Industry 4.0, internet of things, artificial intelligence, simulation, predictive maintenance, production optimization, big data, cloud services, smart manufacturing

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



KAZALO

1	UVOD	1
2	TEORETIČNE OSNOVE DIGITALNIH DVOJČKOV	2
2.1	Definicija in zgodovinski razvoj digitalnih dvojčkov	2
2.2	Petdimenzionalni model digitalnih dvojčkov	3
2.2.1	Fizična dimenzija.....	4
2.2.2	Virtualna dimenzija	4
2.2.3	Podatkovna dimenzija	5
2.2.4	Povezovalna dimenzija	5
2.2.5	Storitvena dimenzija	5
2.3	Simulacije in vizualizacija.....	6
2.4	Ključne tehnologije: internet stvari, umetna inteligenca, masovni podatki in oblačne storitve	6
3	DIGITALNI DVOJČKI V PROIZVODNEM MANAGEMENTU.....	7
3.1	Obvladovanje življenjskega cikla izdelka.....	8
3.2	Optimizacija proizvodnih procesov	9
3.3	Planiranje	9
3.4	Vzdrževanje	10
3.5	Kakovost v proizvodnji	11
4	PREDNOST DIGITALNIH DVOJČKOV	11
4.1	Natančnejša napoved in optimizacija proizvodnje	11
4.2	Izboljšano vzdrževanje in zmanjševanje okvar	12
4.3	Večja fleksibilnost proizvodnje.....	13
4.4	Primeri uporabe	13
5	IZZIVI IN OMEJITVE DIGITALNIH DVOJČKOV	15
5.1	Tehnični izzivi	15
5.2	Poslovni izzivi	16
6	TRENDI IN PRIHODNOST DIGITALNIH DVOJČKOV	17
6.1	Tehnični trendi.....	17
6.2	Aplikacijski trendi	18
6.3	Regulativni in etični trendi.....	19
7	SKLEP.....	19

SEZNAM KLJUČNE LITERATURE	21
LITERATURA IN VIRI	21

KAZALO TABEL

Tabela 1: Pregled uporabe digitalnih dvojčkov v različnih industrijah	14
---	----

KAZALO SLIK

Slika 2: Vizualizacija proizvodne linije	8
<i>Slika 1: Primer virtualnega modela Toyotine tovarne</i>	<i>10</i>

SEZNAM KRATIC

angl. – angleško

CAD – (angl. Computer-aided design); računalniško podprto načrtovanje

CAE – (angl. Computer-aided Engineering); računalniško podprto inženirstvo

CAM – (angl. Computer-aided Manufacturing); računalniško podprta proizvodnja

CPS – (angl. cyber-physical systems); kiber-fizikalni sistem

DM – (angl. Digital Model); digitalni model

DT – (angl. Digital twins); digitalni dvojčki

DS – (angl. Digital shadow); digitalna senca

GPU – (angl. Graphics processing unit); grafični procesor

IIoT – (angl. Industrial Internet of Things); industrijski internet stvari

IoT – (angl. Internet of things); internet stvari

NASA – (angl. National Aeronautics and Space Administration); Nacionalna uprava za letalstvo in vesolje

PLC – (angl. Programmable logic controler); programabilni logični krmilniki

UI – umetna inteligenca

1 UVOD

Industrija se je skozi zgodovino razvijala v več stopnjah, pri čemer je vsaka stopnja prinesla naprednejšo tehnologijo in večjo avtomatizacijo proizvodnih procesov. V obdobju industrij 1.0 in 2.0 so se podjetja zanašala izključno na fizične sisteme, kar je bilo pogosto drago in neučinkovito. S pojavom industrije 3.0 pa so računalniški sistemi omogočili digitalno testiranje izdelkov, kar je zmanjšalo stroške in omogočilo boljše analize proizvodnih procesov (Hu in drugi, 2024).

Podjetja pa so še vedno trpela zaradi nizke učinkovitosti, pomanjkanja kakovostnih podatkov in omejene transparentnosti proizvodnih sistemov. Z napredkom digitalizacije so se začele razvijati napredne tehnologije, kot so računalniki, simulacijska orodja in internet, ki so organizacijam omogočile, da se postopoma premikajo v digitalno okolje (Semeraro in drugi, 2021).

Digitalizacija je pripeljala do konceptov, kot so industrija 4.0, pametna proizvodnja in inteligentna tovarna, katerih cilj je prek informacijske tehnologije povezati fizično in digitalno okolje. Ena izmed ključnih tehnologij, ki je v zadnjem desetletju pridobila na pomenu, je tehnologija digitalnih dvojčkov (angl. Digital twins, v nadaljevanju DT). DT predstavljajo virtualne replike fizičnih sistemov, ki omogočajo spremljanje, simulacije, optimizacijo in napovedovanje v realnem času (Hu in drugi, 2024). Tehnologija DT je prepoznavna po svojih velikih zmožnostih realizacije industrije 4.0 (Lim in drugi, 2020).

DT so postali temelj sodobnih industrijskih sistemov, saj združujejo internet stvari (angl. Internet of Things, v nadaljevanju IoT), podatkovno analitiko, velike podatke in napredne simulacije (Qi in drugi, 2021). S tem podjetjem omogočajo optimizacijo proizvodnih procesov, zgodnje odkrivanje odstopanj in izboljšanje produktivnosti (Fuller in drugi, 2020). Pričakuje se, da bodo DT ostali ena izmed ključnih tehnologij tudi v proizvodnji 5.0 (Maddikunta in drugi, 2022).

Za uvodno seznanitev s področjem in pripravo okvirnega raziskovalnega načrta je bilo uporabljeno orodje generativne umetne inteligence ChatGPT. Zaključna strokovna naloga je sestavljena iz več poglavji, ki sistematično obravnavajo tematiko. V prvem delu so predstavljeni teoretični temelji DT, od razvoja, definicije, modelov in ključnih tehnologij. V tem delu so tudi povzeta orodja, ki se uporabljajo za implementacijo DT. Nadaljuje se na tehnologijo, vezano v proizvodnem managementu, kjer povzamemo glavne uporabe tehnologije DT. V tretjem delu analiziramo prednosti uporabe DT in primere uporabe v praksi, zaključimo pa z izzivi in omejitvami ter trendi omenjene tehnologije.

Namen zaključne strokovne naloge je pregledati relevantno znanstveno literaturo in raziskave na področju DT ter sistematično predstaviti teoretične osnove DT, njihovo implementacijo in vpliv na industrijo. Cilj naloge je teoretično predstaviti DT, povzeti razvoj do danes, predstaviti potrebne tehnološke infrastrukture, podati orodja za vzpostavitev,

analizirati prednost uporabe te tehnologije ter razumeti izzive, s katerimi se podjetja lahko soočajo pri vzpostavitvi te tehnologije.

2 TEORETIČNE OSNOVE DIGITALNIH DVOJČKOV

DT predstavljajo tehnologijo, ki povezuje fizični svet z digitalnim s pomočjo realnočasovnih ali zgodovinskih podatkov za namen simulacije, modeliranja, obvladovanja in analize fizičnih objektov. Njihov glavni cilj je optimizacija delovanja, povečanje zanesljivosti, zmanjševanje stroškov in simulacije (Hu in drugi, 2024). Dostopnost podatkov generiranih DT pa je na voljo komurkoli, ki ima ustrezno avtorizacijo za pregled in operiranje z njimi (Liau, 2018).

Vzpostavitev DT zahteva celovito razumevanje fizičnega sveta, saj so virtualni modeli neposredno povezani s svojimi fizičnimi različicami. Popolna digitalna kopija fizičnega sistema je pogosto težko dosegljiva, saj zahteva obsežno digitalizacijo in podatkovno integracijo (Qi in drugi, 2021).

2.1 Definicija in zgodovinski razvoj digitalnih dvojčkov

Digitalizacija je v industriji prešla štiri ključne stopnje razvoja. Prva stopnja, digitalna zmožnost, je zajemala prenos podatkov iz papirnih v digitalne oblike. Druga stopnja, digitalna podpora, se je osredotočala na uporabo računalniško podprtih sistemov, ki so v osemdesetih omogočili digitalizacijo procesov načrtovanja in proizvodnje. Na tej stopnji so se pojavile prve oblike DT. Tretja stopnja, digitalna kontrola in povezava, je vključevala izboljšanje sistemov s pomočjo interneta in podatkovnih tehnologij, kar je omogočilo boljšo povezljivost in integracijo informacijskih sistemov. Zadnja, četrta stopnja, v katero spadajo tudi DT, je integracija kiber-fizikalnih sistemov (angl. Cyber-physical systems, v nadaljevanju CPS), ki omogočajo popolno povezavo v realnem času in predstavljajo temelj pametne proizvodnje (Qi in drugi, 2021).

DT in CPS imata podobnosti med povezovanjem fizičnega in virtualnega sveta. Medtem ko CPS poudarja integracijo računalniških algoritmov s fizičnimi procesi, DT to integracijo razširijo na celovito virtualno reprezentacijo (Ojstersek in drugi, 2023). Virtualni objekti temeljijo na podatkih fizičnih objektov, kar omogoča natančno simulacijo njihovih parametrov (Qi in drugi, 2021). DT se razlikujejo od digitalne sence (v nadaljevanju DS) in digitalnega modela (v nadaljevanju DM). DM je replika fizičnega modela, vendar ne vsebuje avtomatskega prenosa podatkov med fizičnim modelom in DM. DS pa predstavlja enosmerni prenos podatkov, ki jih model pridobi na podlagi fizičnega objekta (Attaran in drugi, 2024).

Prvi koncept DT je bil predstavljen leta 2003. Profesorja Grieves iz Univerze v Michiganu ga je opredelil kot del obvladovanja življenjskega cikla izdelka (Attaran in drugi, 2024). Leta

2012 sta Nacionalna uprava za letalstvo in vesolje (angl. National Aeronautics and Space Administration, v nadaljevanju NASA) in Ameriško letalstvo formalizirala koncept in ga umestila kot ključni tehnološki element za simulacije vesoljskih in letalskih sistemov (Hu in drugi, 2024). NASA je definirala DT kot večfizikalni, večnivojski in verjetnostni simulacijski model, ki uporablja tako zgodovinske kot realnočasovne podatke za dinamično odražanje fizičnega dvojčka (Qi in drugi, 2021). V letu 2016 je Siemens vpeljal DT v industrijo 4.0, kar je povečalo zanimanje za to tehnologijo, še posebej na Kitajskem (Hu in drugi, 2024).

Hiter razvoj IoT, naprednih senzorjev in podatkovne analitike je omogočil, da so DT postali osrednji element pametne proizvodnje, njegove aplikacije pa središče inovacij (Qi in drugi, 2021). V letih 2017 in 2018 je Gartner prepoznal DT kot enega izmed desetih najbolj obetavnih tehnoloških trendov prihodnjega desetletja (Tao in drugi, 2019) in ocenil, da bo tehnologija zrela v naslednji 5–10 letih (Abisset-Chavanne in drugi, 2024). Do leta 2027 pa napoveduje, da bo 40 % večjih korporacij uporabljalo tehnologijo DT (Attaran in drugi, 2024). Danes DT predstavljajo enega od ključnih stebrov industrije 4.0, saj omogočajo optimizacijo procesov, predikativno vzdrževanje in izboljšanje operativne učinkovitosti (Hu in drugi, 2024). Implementacija tehnologije pa se je razširila na celoten življenjski cikel izdelka (Tao in drugi, 2019). Njihova sposobnost integracije IoT in podatkovne analitike omogoča stalno komunikacijo med fizičnim in digitalnim svetom, kar vodi v boljše odločanje, zmanjšanje stroškov in povečanje učinkovitosti (Fuller in drugi, 2020). Po zaslugi razvoja interneta IoT so DT postali stroškovno učinkoviti in ekonomsko dostopni v različnih industrijah (Maddikunta in drugi, 2022).

Ker se tehnologija DT še razvija, njihova definicija ni povsem ustaljena. Analiza 15.000 znanstvenih člankov je pokazala, da lahko DT razvrstimo v dve glavni kategoriji. Prva kategorija so visoko zmogljivi DT v realnem času, ki se uporabljajo za natančen nadzor sistemov v realnem času. Druga kategorija so DT za dolgoročno podporo pri odločitvah, ki zagotavljajo strateško podporo pri odločanju in dolgoročnem načrtovanju (Abdelrahman in drugi, 2025). V praksi se definicija prilagaja uporabi, vendar se najpogosteje nanaša na fizični objekt, ki ga digitalno podvaja (Hu in drugi, 2024).

2.2 Petdimenzionalni model digitalnih dvojčkov

Grieves je prvotno koncept definiral kot tridimenzionalni model, sestavljen iz fizičnega objekta, virtualnega objekta in povezave med njima (Tao in drugi, 2019). Leta 2018 pa se je predlagala razširitev za dve dimenziji z namenom uporabe v več industrijah (Qi in drugi, 2021). Vseh pet dimenzij je enako pomembnih, saj skupaj omogočajo celostno delovanje DT. Model vključuje fizični objekt, virtualni model, povezavo, podatke in storitve (Tao in drugi, 2019). V raziskovalnih delih in publikacijah lahko najdemo tudi ostale različice modelov.

Glede na področje in namen uporabe DT je treba te pogosto prilagajati in razvijati po meri. Temu primerno se lahko med različnimi DT orodja in tehnologija za njihovo vzpostavitev spreminjajo (Qi in drugi, 2021). V raziskovalnih delih lahko najdemo tudi več različnih modelov DT, vsem pa je skupno, da izhajajo iz prvotnega koncepta in si delijo vsaj te tri osnovne dimenzije (Abisset-Chavanne in drugi, 2024).

2.2.1 Fizična dimenzija

Fizična dimenzija predstavlja osnovo DT, saj je fizični objekt tisti, ki se ga nadzoruje in optimizira. Fizični objekt lahko predstavlja stroje, izdelke, proizvodne procese, senzorje, orodja ali pa celotne sisteme (Tao in drugi, 2019). Glavna funkcija dimenzije je omogočanje zajema podatkov iz fizičnega objekta ali okolja ter njihovo posredovanje DT za nadaljnjo obdelavo in analizo (Hu in ostali, 2024).

Orodja, ki omogočajo delovanje te dimenzije, pa se delijo na dve glavni skupini, orodja za zaznavo fizičnega objekta, ki omogočajo zajem prek strojne opreme, programske opreme in mrežnih podatkov, ter orodja za nadzor fizičnih objektov, ki omogočajo njihovo prilagajanje na podlagi virtualnih analiz in simulacij. Nekatera orodja za zaznavanje so Halcon, Evision, VisionPro, Matlab, Labview, Ali cloud Iot, za nadzor pa lahko izpostavimo TwinCAT, FANUC, Siemensov MindSphere, Codesys in druge (Qi in drugi, 2021).

2.2.2 Virtualna dimenzija

Virtualna dimenzija DT predstavlja virtualni objekt svojega dvojčka, fizičnega objekta (Hu in drugi, 2024). Za celovito reprezentacijo fizičnega objekta potrebujemo različne modele, kot so geometrijski, fizikalni, vedenjski ali logični model (Qi in drugi, 2021) in temeljijo na fizikalnih zakonitostih ali podatkih (Hu in drugi, 2024). Glavne funkcije dimenzije so gradnja, kalibracija, združevanje in optimizacija modelov, kar omogoča natančno simulacijo fizičnih objektov (Tao in drugi, 2019). Za namene uporabe DT za celoten proces pa potrebujemo tudi procesne in proizvodne podatke ter podatke o sredstvih, ki jih virtualno podvajamo (Bao in drugi, 2018).

V določenih primerih za vzpostavitev želene digitalne reprezentacije ni treba uporabiti vseh možnih modelov. Dejstvo pa je, da se z večjo inkorporacijo modelov natančnost in realnost simulacijskega okolja povečujeta, s tem pa tudi kompleksnost DT (Qi in drugi, 2021).

Za vzpostavitev celotne platforme med virtualnim in fizičnim objektom poznamo orodja, kot sta Twin builder in Simens NX. Za modeliranje pa se orodja delijo glede na njihov namen. Za geometrijsko modeliranje se uporabljajo AutoCAD, CATIA in Solidworks, za fizikalno modeliranje ANSYS Twin Builder in Simulink, za vedenjsko modeliranje Twin builder in 3D Max ter za logično modeliranje orodja, kot so MindSphere, MatLab in Spider (Qi in drugi, 2021).

2.2.3 Podatkovna dimenzija

Podatki so pomembni že na začetku ustvarjanja DT, saj na podlagi razpoložljivih podatkov in zahtev sistema predstavljajo osnovo za ustvarjanje DT (Ran in drugi, 2022). Dimenzija vključuje realnočasovne, mehanske, procesne in zgodovinske podatke, ki so ključni za analizo in podporo odločanju (Hu in drugi, 2024). DT obvladujejo ogromne količine podatkov, tako v fizičnem kot v virtualnem svetu, in so osrednji element DT (Tao in drugi, 2019).

Podatki so pridobljeni s pomočjo senzorjev in naprav, nameščenih v fizičnem sistemu, ki omogočajo bilateralno komunikacijo v realnem času s pomočjo različnih komunikacijskih vmesnikov in varnostnih protokolov (Liao, 2018). Za učinkovito uporabljanje podatkov pa so ključne naslednje stopnje: predhodna obdelava, rudarjenje in optimizacija podatkov (Tao in drugi, 2019). Orodja, ki omogočajo normalno delovanje te plasti, pa se delijo glede na naslednje funkcionalnosti: zbiranje, prenos, shranjevanje, obdelava, združevanje in vizualizacija (Qi in drugi, 2021).

Nekatera izmed poznanih orodij za zbiranje in pošiljanje podatkov so MindSphere in Thingworx, za shranjevanje Oracle in MySQL, za procesiranje Spark, Predix in 3D Experience, za podatkovno fuzijo Pycharm, Matlab in Predix ter za podatkovno vizualizacijo Tableau, Excel in Charts (Qi in drugi, 2021).

2.2.4 Povezovalna dimenzija

Povezovalna dimenzija omogoča usklajeno delovanje DT s fizičnim sistemom ter omogoča njegovo prilagodljivost na spreminjajoče se pogoje. Za učinkovito delovanje morajo biti vsi deli DT medsebojno povezani in sposobni interakcije. Poznamo tri glavne vrste interakcije fizično-fizična, virtualno-virtualna in fizično-virtualna (Tao in drugi, 2019). Orodja, ki omogočajo vmesno interakcijo, lahko temeljijo na oblaki tehnologiji, poleg tega pa nekatera izmed njih nudijo tudi simulacijo in vizualizacijo (Bao in drugi, 2018). Interakcija med napravami in znotraj DT lahko poteka žično ali brezžično, brezžična tehnologija pa se dodatno deli na kratke in dolge razdalje. Nekatera bolj znana orodja, ki omogočajo povezovanje DT, so ThingWorx, Siemens MindSphere in Cisco Jasper Control Center (Qi in drugi, 2021).

2.2.5 Storitvena dimenzija

Storitvena dimenzija se nanaša na funkcionalni del DT (Tao in drugi, 2019) in predstavlja različne aplikacije in storitve, ki omogočajo uporabniku izkoriščati to tehnologijo glede na njihov namen (Abisset-Chavanne in drugi, 2024). Nekaterne ključne storitve so simulacija, optimizacija, spremljanje, diagnostika, napovedovanje, prilagajanje fizičnih sistemov (Tao in drugi, 2019) in zajemanje ter deljenje znanja (Qi in drugi, 2021). DT ne omogočajo le

izboljšanja obstoječih storitev, ampak tudi razvoj novih, prilagojenih specifičnim potrebam uporabnikov (Tao in drugi, 2019).

Orodja za storitvene aplikacije lahko delimo v štiri glavne kategorije (Qi in drugi, 2021):

- platformna storitvena orodja, kot sta ThingWork in Siemens MindSphere, omogočajo vključevanje ostalih ključnih tehnologij v DT, primer IoT;
- simulacijska storitvena orodja, kot sta MatLab in Simulink;
- optimizacijska storitvena orodja, kot so ANSYS Simulation platform, IDM Blue Mix, Predix in Siemens Plant Simulation;
- diagnostična in prognostična storitvena orodja, kot so ThingWorx, Azure IoT in Twin Builder.

2.3 Simulacije in vizualizacija

Simulacije so ključna funkcionalnost DT, saj omogočajo napredno analizo, preizkušanje različnih scenarijev in izboljšanje učinkovitosti proizvodnje, ki jih lahko podjetje umesti v fizični svet. Podjetja lahko tako prepoznajo ozka grla, slabo izkoriščene vire in analizirajo stroške proizvodnje. Hkrati pa jim omogočajo natančno napovedovanje okvar, optimizacijo delovanja strojev in prilagajanje proizvodnih parametrov v realnem času. Simulacije in optimizacije se dogajajo v virtualnem modelu in omogočajo ustvarjanje virtualnih scenarijev brez poseganja v fizične procese. To je mogoče s tehnikami, kot so »kaj-če« analize ali napovedno modeliranje (Qi in drugi, 2021). Če so rezultati v virtualnem modelu ustrezni, se lahko implementirajo tudi v fizični svet (Abisset-Chavanne in drugi, 2024). Orodja, ki omogočajo to funkcionalnost, so omenjena pri storitveni dimenziji.

Vizualizacija podatkov omogoča uporabnikom jasne in intuitivne vpoglede v delovanje sistemov v realnem času. Vizualizacijska orodja pa omogočajo hiter prikaz ključnih matrik, prepoznavanje trendov in zaznavanje anomalij (Qi in drugi, 2021). Nekatera bolj prepoznavna vizualizacijska orodja na tem področju so omenjena pri podatkovni dimenziji.

2.4 Ključne tehnologije: internet stvari, umetna inteligenca, masovni podatki in oblačne storitve

DT so odvisni od naprednih tehnologij, ki omogočajo njihovo učinkovito delovanje in integracijo v industrijske procese (Qi in drugi, 2021). Ključne tehnologije, ki podpirajo razvoj in implementacijo DT, vključujejo IoT, umetno inteligenco (v nadaljevanju UI), analitiko velikih podatkov, simulacijske tehnologije, oblačne storitve (Fuller in drugi, 2020), razširjeno resničnost, virtualno resničnost in modeliranje (Hassija in drugi, 2024). Vsaka izmed teh tehnologij igra ključno vlogo pri vzpostavitvi DT, saj omogoča zajem, obdelavo, analizo in vizualizacijo podatkov ter njihovo povezovanje s fizičnimi sistemi (Fuller in drugi, 2020).

IoT predstavlja medmrežno tehnologijo, ki povezuje različne pametne naprave in senzorje prek interneta z namenom izmenjave in deljenja informacij. Do leta 2030 je napovedano, da bo število IoT preseglo 125 milijard, do leta 2025 pa naj bi velikost generiranih podatkov teh naprav dosegla 794,4 zetabajtov. Vključujejo različne naprave in tehnologije, kot so senzorji in pametne naprave, tehnologijo radiofrekvenčne identifikacije in globalni sistem pozicioniranja (Wang in drugi, 2025). Ko govorimo o IoT v industriji, pa se sklicujemo na industrijski internet stvari (angl. Industrial Internet of Things, v nadaljevanju IIoT) (Geng, 2025). Naloga IIoT je povezovanje fizičnih objektov v industriji, ki jih DT virtualno podvajajo. Do leta 2027 pa se napoveduje da bo vsaj 90 % naprav IoT kompatibilnih z DT (Attaran in drugi, 2024).

Računalništvo v oblaku nudi ostalim tehnologijam možnosti izračunavanja in shranjevanja podatkov ter je pogosto bolj ugodno kot razvijanje lastnih rešitev, podatki pa so dostopni s katerekoli lokacije ali naprave (Attarano in drugi, 2024). Tehnologija omogoča, da si uporabniki ali podjetja medsebojno delijo strojno in programsko opremo. Tradicionalno računalništvo v oblaku je prepočasno za IoT in DT, saj so podatkovni centri lahko preveč oddaljeni. Temu primerno se je razvilo robno računalništvo, ki služi kot vmesna plast med IoT in računalništvom v oblaku in omogoča, da se procesi dogajajo bližje fizičnemu objektu (Al-Dulaimy in drugi, 2024).

UI zajema več tehnologij, kot so robotika, prepoznavanje slik, prepoznavanje jezika, nevronske mreže, strojno učenje in globoko učenje. UI lahko pomaga DT z naprednimi analitikami in avtomatskim analiziranjem podatkov (Attaran in drugi, 2024). UI lahko deluje tudi na podlagi manj urejenih podatkov, saj je zmožna s pomočjo algoritmov samostojno prepoznavati vzorce in klasificirati podatke brez človeškega posredovanja (Fuller in drugi, 2020).

Masovni podatki predstavljajo ekstremno velike in kompleksne zbirke podatke, ki jih je zahtevno uporabljati, procesirati in analizirati s tradicionalnimi metodami (Jin in drugi, 2024). Tehnologija omogoča zajemanje, predhodno obdelavo, shranjevanje, procesiranje in analizo ogromnih količin podatkov, ki jih generirajo naprave IoT (Fuller in drugi, 2020).

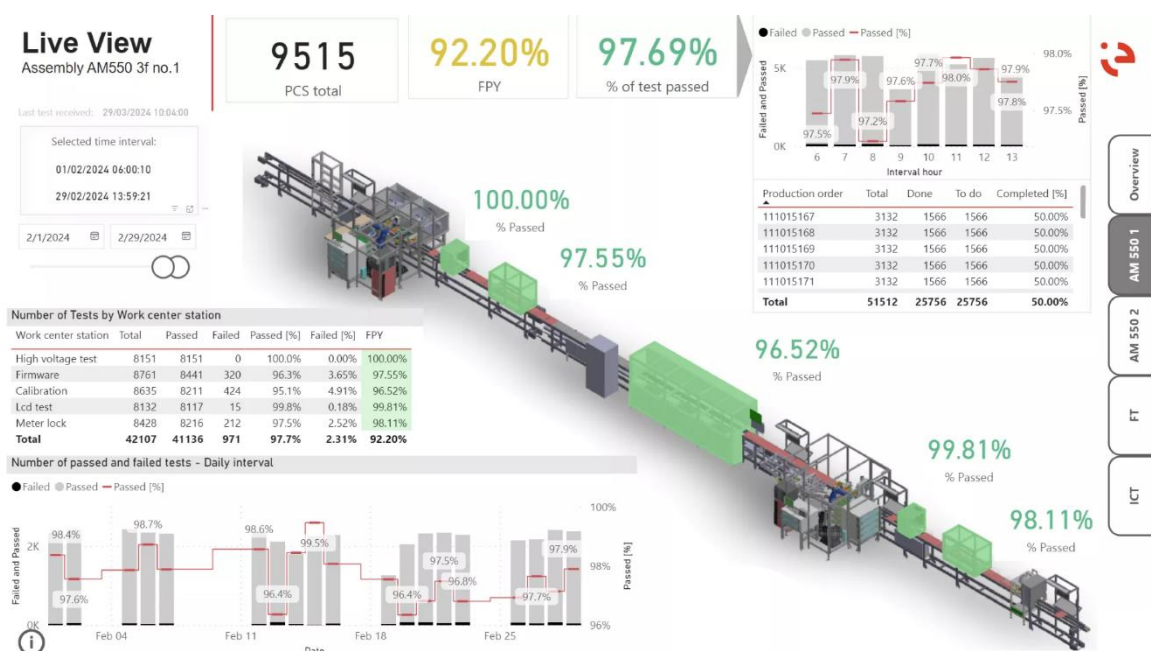
3 DIGITALNI DVOJČKI V PROIZVODNEM MANAGEMENTU

Tehnologija DT se lahko uporablja v proizvodnih strategijah, kot so vitka, odporna, agilna, trajnostna, sprotna in prilagodljiva proizvodnja. S prepoznavanjem neučinkovitosti in ozkih grl podpira načela vitke proizvodnje, saj zmanjšuje korake, ki ne dodajajo dodane vrednosti, in posledično izboljšuje učinkovitost. Sprotno proizvodnjo (angl. Just-in time) podpira z zagotavljanjem podatkov o zalogah in proizvodnih načrtov v realnem času, s tem pa omogoča prilagoditve glede na povpraševanje. Agilno in prilagodljivo proizvodnjo lahko podpira z možnostjo hitrega preoblikovanja proizvodnih procesov glede na zahteve kupcev

ali dinamiko industrije. Vsa omenjene prednosti in možnosti podpiranja proizvodnih industrij pa sovpadajo tudi s cilji trajnostne proizvodnje (Soleymanizadeh in drugi, 2023).

DT lahko realizirajo vzpostavitev virtualnega modela proizvodnih obratov, ki je virtualno odražen v realnem času in bi lahko prikazoval planiranje, trenutne operacije, napake, zasedenost, kakovost in realizacijo planov (Lang in drugi, 2021). Slika 2 prikazuje primer virtualnega modela proizvodnje linije v podjetju Iskraemeco, kjer so realnočasovno prikazani pomembni kazalniki le-te.

Slika 1: Vizualizacija proizvodne linije



Vir: Iskraemeco (2024).

3.1 Obvladovanje življenjskega cikla izdelka

DT lahko izboljšajo celoten življenjski cikel izdelka, saj s pomočjo virtualnih modelov omogočajo podjetjem testiranje dizajna v simulacijskem okolju že na začetnih stopnjah, kar lahko zmanjša potrebo po fizičnih prototipih in testiranjih v proizvodnji (Hu in drugi, 2024). Prav tako so lahko uporabni tudi na koncu življenjskega cikla izdelka, saj se lahko na podlagi virtualnega modela analizira, kateri proizvodni materiali so še vedno uporabni za nadaljnjo uporabo (IBM, 2021). Posledično se zmanjšujejo napake in izboljšuje kakovost tekom celotnega življenjskega cikla izdelka (Ran in drugi, 2022). Z nadaljnjimi analizami pa omogoča tudi testiranje optimalnih proizvodnih parametrov tudi na kasnejših stopnjah (Qi in drugi, 2021). Glede na vedno bolj ambiciozne časovnice pa DT pripomorejo k njihovi lažji realizaciji (Ran in drugi, 2022). Hkrati pa lahko zmanjšajo potrebo po dodatnem specializiranem kadru (Liu, 2018).

Za industrije, kjer je prisotno plastično brizganje, je bil v letu 2018 razvit koncept, ki pokriva vse tri stopnje te industrije (razvoj orodja, izgradnja orodja in proizvodnjo). Koncept je poudarjal, da je razvoj orodja najdražji del, saj je prilagoditev orodij zelo drago. Trenutno že obstajajo orodja, ki simulirajo delovanje in obnašanje orodij. Na podlagi potrditve simulacij se testiranja zgodijo na brizgalnih strojih, rezultati pa služijo kot ponoven vhod za prilagoditev orodij. Koncept poudarja, da se lahko s pomočjo DT celoten proces poveže, izboljša in poceni (Liau, 2018).

3.2 Optimizacija proizvodnih procesov

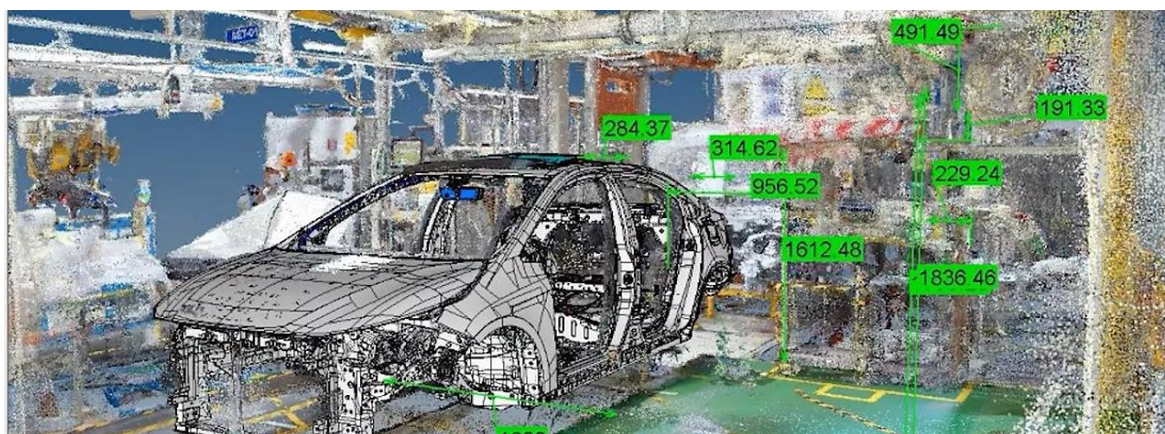
Tradicionalno spremljanje proizvodnje se pogosto zanaša na senzorje in kamere, kar lahko povzroča zamude pri prepoznavanju napak, še posebej, če sistemi niso povezani v pametno infrastrukturo (Hu in drugi, 2024). S tehnologijo DT se zaradi njenega konstantnega spremljanja proizvodnje ta čas drastično zmanjša, v številnih primerih pa celo izniči, saj je sistem možen predhodno napovedati zastoj ali pa celo avtomatsko prilagoditi parametre, da do zastojev in napak ne pride (Attaran in drugi, 2024). Tehnologija pa se lahko uporablja tudi kot nadomestek človeških operaterjev pri sprejemanju odločitev, ki so odvisne predvsem od njihovega znanja in izkušenj (Hu in drugi, 2024).

DT omogočajo neprekinjeno analizo vhodnih podatkov skozi daljše časovno obdobje. Rezultati analiz pa lahko razkrijejo trende in odstopanja od spremenljivega statusa (Attaran in drugi, 2024). Na podlagi teh analiz in trenutnega stanja proizvodnje lahko DT predlaga optimizacije glede na simulacije, ki jih ustvari v virtualnem modelu. Analize lahko vključujejo tudi zelo detaljne proizvodne procese, kot je optimizirano planiranje poti operativnih robotov, kar lahko vodi do zmanjšanja proizvodnega časa (Lang in drugi, 2021). Optimizacije in simulacije se dogajajo brez poseganja v fizične sisteme. Dve bolj preprosti metodi za izvajanje sta »kaj-če« analize in napovedno modeliranje (Qi in drugi, 2021).

3.3 Planiranje

Glede na razvoj ključne tehnologije imajo pametne proizvodnje na volje vse ključne podatke, ki bi jih lahko z implementacijo DT uporabljale za bolj točno planiranje proizvodnje. DT bi imeli dostop do trenutnega stanja v proizvodnji, prihodnjih potreb, razpoložljivosti ter zalog (Luber in drugi, 2025). Z optimiziranjem proizvodnega plana pa lahko zagotavlja, da so kritične komponente proizvedene pravočasno. Planiranje se lahko uporabi tako za sredstva kot tudi za planiranje delovne sile, logističnega pretoka (Attaran in drugi, 2024) ali postavitev proizvodnje glede na prostorske omejitve (Lang in drugi, 2021). Za doseganje celotne slike proizvodnje so v Toyoti primerjali postopek z Googlovim mapami, kjer so se inženirji z napravami za skeniranje sprehodili po proizvodnji in s tem ustvarili digitalni model (Toyota, 2023). Slika 1 prikazuje primer digitalne replike Toyotine tovarne. Na prikazu sta razvidna prostorska postavitev delovnega mesta ter karoserija avtomobila.

Slika 2: Primer virtualnega modela Toyotine tovarne



Vir: Toyota Europe (2023).

DT lahko tudi pomagajo pri boljšem planiranju pretoka materiala in izkoriščanju območij nedokončane proizvodnje (Lang in drugi, 2021). Za namen pridobivanja dodatnih informacij območij se lahko koristi tehnologijo radiofrekvenčne identifikacije, ostale ključne informacije pa so lahko pridobljene prek sistemov načrtovanja virov podjetja, sistemov za obvladovanje podatkov o izdelku ali ostalih sistemov (Bao in drugi, 2018). Z določitvijo ključnih kazalnikov in kritičnih parametrov pa lahko ustvarimo virtualno spremljanje proizvodnje, kar lahko znatno poveča kakovost in produktivnost (Ran in drugi, 2022).

Planiranje se lahko izvaja tudi za več proizvodnih obratov ali podjetij hkrati. Dodatno pa lahko modeli vključujejo tudi dobavitelje, kjer lahko DT z analitiko podatkov napovejo potencialne zamude in prilagodijo dobavne strategije (Berko, 2025).

3.4 Vzdrževanje

Preventivno vzdrževanje se osredotoča na napovedovanje optimalnega časa za vzdrževanje na sistemih in napravah, s čimer zmanjša stroške in povečuje razpoložljivost strojev. Napovedno vzdrževanje omogoča organizacijam preprečiti težave zaradi nenadne okvare in s tem potencialno podaljša življenjsko dobo sredstev, izboljša razpoložljivost opreme in zmanjša tveganja. DT s to aplikacijo so najbolj znani v letalski industriji (Attaran in drugi, 2024).

DT imajo ključno vlogo pri analiziranju in napovedovanju tehničnega stanja sistemov. Največ aplikacij na tem področju najdemo v letalski industriji, kjer DT omogočajo napovedovanje življenjske dobe konstrukcij in optimizacijo načrtovanja vzdrževanja letal (Tao in drugi, 2019).

3.5 Kakovost v proizvodnji

DT lahko zaradi povezanosti procesov, sprotnega prilagajanja in spremljanja zmanjšajo število defektov v proizvodnji. Posredovanje operaterja pa se zmanjša, saj DT omogočajo zmanjševanje periodičnega preverjanja kakovosti izdelka in števila posredovanj še posebej v masovnih proizvodnjah (Bao in drugi, 2018).

Glede na zgodovinske podatke, vključno s poročilom o kakovosti, lahko DT na podlagi scenarijev predlaga priporočila proizvodnji, da doseže čim višjo kakovost produktov. Če bo v virtualnem modelu analiza pokazala, da bi bila sprememba pozitivna, se jo lahko kasneje implementira v fizični model (Abisset-Chavanne in drugi, 2018).

DT omogoča tudi sprotno napovedovanje napak izdelkov glede na obrabo stroja in lastnost materiala. S podatki, ki jih pridobi sistem, bodisi zgodovinskih ali teh v realnem času, lahko s pomočjo globokega učenja DT zazna v realnem času, kdaj je prišlo do napake. V določenih primerih lahko napako odpravimo v realnem času, vendar so za to potrebni dobro razviti modeli DT (Fu in drugi, 2025). V industrijah, kjer je primarna dejavnost izdelava elektronskih naprav, pa se je pokazalo, da podjetja v povprečju zmanjšujejo napake oziroma izmet za približno 20 % s pomočjo tehnologije DT (McKinsey, 2024).

4 PREDNOST DIGITALNIH DVOJČKOV

DT ponujajo številne strateške prednosti, saj omogočajo natančno digitalno repliko fizičnih sistemov, ki upošteva njihove lastnosti, gibanje, stanje in položaj. V kombinaciji z naprednimi IT-tehnologijami in tipali DT omogočajo spremljanje, diagnostiko, napovedovanje in optimizacijo delovanja sistemov. Na podlagi analize zgodovinskih podatkov, trenutnih razmer in napovedi prihodnjega razvoja lahko podjetja z uporabo DT izboljšajo odločanje v proizvodnem managementu ter optimizirajo svoje procese (Qi in drugi, 2021).

Njihova ključna prednost je možnost vizualizacije, sprotnega posodabljanja in optimizacije procesov v realnem času. Omogočajo hitrejši in bolj učinkovit razvoj izdelkov, izboljšujejo kakovost proizvodnje ter optimizirajo vzdrževanje in obvladovanje sistemov (Tao in drugi, 2019). Analitiki napovedujejo, da bo aplikacija DT v industriji 4.0 prinesla do 25 % povečane organizacijske učinkovitosti (Attaran in drugi, 2024). Podjetja, ki bodo prva uporabljala DT, pa bodo drastično pretresla trg, na katerem nastopajo (McKinsey, 2024).

4.1 Natančnejša napoved in optimizacija proizvodnje

DT omogočajo proizvajalcem bolj natančne napovedi, racionalne odločitve in optimizirano proizvodnjo. S pomočjo digitalnih modelov podjetja pridobijo CPS, ki natančno odraža realne razmere in proizvodne procese, kar pomeni izboljšano analitično ocenjevanje,

točnejše napovedi proizvodnih potreb in boljše možnosti optimizacije procesov (Qi in drugi, 2021).

Ena izmed ključnih lastnosti DT je sposobnost izvajanja naprednih simulacij, ki se uporabljajo skozi celoten življenjski cikel izdelka. Zaradi nenehnega dostopa do realnočasovnih in zgodovinskih podatkov DT omogočajo proaktivno prilagajanje proizvodnih procesov, kar vodi v zniževanje stroškov, večjo produktivnost in izboljšano odzivnost na spremembe v povpraševanju (Qi in drugi, 2021).

Ocenjuje se, da tehnologija DT ne bo drastično izboljšala časa proizvodnje, ko bo implementirana v napredne in že dovršene avtomatizirane proizvodne procese. Večji prispevek uporabe DT se vidi pri zmanjševanju zastojev zaradi napovedovanja in prilagajanja parametrov v realnem času. Prav tako DT pripomorejo k izboljševanju podpornih procesov, kot je dostava vhodnega materiala prek avtonomnih logističnih vozil (Bao in drugi, 2018).

DT lahko služi tudi kot vmesnik za boljše zajemanje podatkov in medsebojno povezovanje naprav, saj omogoča, da so podatki, ki so zajeti iz več PLC, združeni in analizirani (Cimino in drugi, 2019). DT-rešitve lahko optimizirajo proizvodni plan za dostavo kritičnih komponent pravočasno ob najnižjih stroških. Z upoštevanjem razpoložljivih sredstev, kot so material, sredstva in osebje, pa lahko avtonomno postavijo plan proizvodnje (Attaran in drugi, 2024).

4.2 Izboljšano vzdrževanje in zmanjševanje okvar

DT igrajo ključno vlogo pri napovednem vzdrževanju in zmanjševanju okvar strojev. Njihova sposobnost neprekinjenega spremljanja delovanja strojev omogoča zgodnje odkrivanje anomalij in napovedovanje potencialnih težav. Ključne koristi vključujejo (Qi in drugi, 2021):

- zmanjšanje nepričakovanih okvar,
- optimizacijo vzdrževanja na podlagi realnih potreb,
- znižanje stroškov popravil in
- podaljšanje življenjske dobe strojev in opreme.

Z uporabo senzorjev in IoT-naprav DT zbirajo podatke o ključnih parametrih strojev, kot so temperatura, vibracije, poraba energije in obremenitve. Ti podatki se nato analizirajo s pomočjo strojnega učenja in analitičnih modelov, kar omogoča zgodnje zaznavanje morebitnih napak in priporočanje ukrepov za odpravo težav (Qi in drugi, 2021).

DT nudijo proaktivni pristop k vzdrževanju in popravilu, saj lahko na podlagi virtualnega okolja DT predvidi potencialne težave ali pa identificirajo elemente, ki so nagnjeni k okvari.

Vzdrževalne ekipe lahko na podlagi njih bolj učinkovito razporedijo svoja sredstva (Hassija in drugi, 2024).

Za primer CNC-strojev so pri aplikaciji DT ugotovili, da potrebujejo manj tipal kot pri tradicionalni metodi napovedovanja, ki vključuje naprednejše tehnologije, kot so analiza masovnih podatkov, umetne nevrološke mreže, avtoregresivni modeli in vektorski podporni stroji. Dodaten izziv v primeru CNC-strojev je oteženo zbiranje podatkov po tradicionalni metodi zaradi problematike implementiranja potrebnih senzorjev na ključne strojne komponente. Z implementacijo DT lahko z obstoječimi senzorji zagotovijo boljše razumevanje podatkov ter bolj natančno preventivno in napovedno vzdrževanje. Glede na testiranja so ugotovili, da so se napake v napovedovanju drastično zmanjšale. Na podlagi določenih tradicionalnih modelov je verjetnost napake znašala 20 %, s pomočjo DT pa se je odstotek napake zmanjšal na 6,21 % (Luo in drugi, 2020).

4.3 Večja fleksibilnost proizvodnje

Zaradi zmožnosti virtualnega testiranja in optimizacije procesov DT omogočajo večjo prilagodljivost proizvodnje, kar podjetjem omogoča hitrejše odzivanje na tržne spremembe in lažje prilagajanje proizvodnih linij novim izdelkom. Ključne prednosti vključujejo hitrejše prilagajanje proizvodnih sistemov novim izdelkom, znižanje stroškov razvoja in optimizacijo prototipov, večjo prilagodljivost proizvodnje glede na povpraševanje ter boljše načrtovanje zalog in logističnih operacij (Qi in drugi, 2021).

DT omogočajo napovedovalno analizo različnih scenarijev proizvodnje, kar podjetjem pomaga pri optimizaciji proizvodnih procesov in zmanjšanju tveganja pri uvajanju novih izdelkov (Qi in drugi, 2021). Podjetja pa lahko glede na raziskave tudi razpolovijo razvojni čas (McKinsey, 2024).

DT lahko podjetjem predstavljajo testna okolja za nove ideje, simulacije scenarijev ali treniranje operaterjev brez tveganj. Z nadaljnjo implementacijo dodatnih tehnologij, kot so UI, pa podjetjem omogočajo še bolj točne in dinamične simulacije glede na njihove zahteve in razpoložljiva sredstva. Inženirji lahko na njihovi podlagi preverijo, kakšne so možnosti implementacije novih izdelkov ter kakšne spremembe bi morali narediti bodisi glede trenutne zmogljivosti ali pa izdelka, da lahko dosežejo uspešno implementacijo (Hassija in drugi, 2024).

4.4 Primeri uporabe

Študije so pokazale, da se v 38 % primerov DT uporabljajo za namen analiziranja in napovedovanja tehničnega stanja sistemov, 35 % za proizvodne sisteme, 18 % za dizajn ter 9 % za ostale namene (Attaran in drugi, 2024). Skoraj 75 % podjetij pa že uporablja DT vsaj na srednji ravni kompleksnosti (McKinsey, 2024).

Primer implikacije DT v proizvodni proces je Shandong tovarna na Kitajskem, kjer so s sistemom ugotovili, da lahko podjetje prihrani do 40 % stroškov delovne sile za vzdrževanje in razpolovi potrebo po fizičnem posredovanju proizvajalcev opreme. Implementirali so sistem poročanja, ki v primeru zastojev in okvar pošlje avtomatsko sporočilo znotraj ene sekunde. Sistem tudi omogoča vodstvu spremljanje celotnega procesa virtualno in zajema 20.000 podatkovnih prihodov ter deluje s hitrostjo 75 sličic na sekundo čez celotno proizvodnjo. Organizaciji pa je sistem nudil možnost vizualizacije s čelado virtualne resničnosti, kjer so si lahko vodje virtualno ogledali logistične scenarije, novim zaposlenim pa je omogočal boljše izobraževanje in uvajanje v podjetje (Ran in drugi, 2022).

Univerza v Mariboru je objavila članek o eksperimentu, ki so ga izvedli v laboratorijskem okolju s pomočjo orodja Simio. S pomočjo eksperimenta so raziskovali možnost uporabe DT za optimizacijo naprednih proizvodnih sistemov ter primerjali, če so podatki DT primerljivi z njegovim fizičnim objektom. Ugotovili so, da so povprečna odstopanja virtualnega modela znašala 4,9 % od fizičnega sistema glede na petdnevno testiranje. Zaključek naloge je bil, da tehnologija DT omogoča zadovoljivo reprezentacijo proizvodnih sistemov (Ojstersek in drugi, 2023).

Univerza v Singapurju je patentirala razvoj pametnega mehkorobotskega prijemala, kjer so z uporabo DT v virtualnem okolju simulirali identifikacijo objektov in prikazovali robotske manipulacije v realnem času, kar ima potencialne možnosti uporabe tudi v proizvodnem procesu. S pomočjo senzoričnih podatkov in algoritmov jim je uspelo prepoznati različne objekte z natančnostjo 98,1 % (Jin in drugi, 2020).

Podjetje Siemens je s pomočjo različnih orodij in sistemov uspelo razviti testno orodje za testiranje vlakov. S tehnologijo DT so vzpostavili sistem, ki jim je omogočal prihraniti do 90 % časa, potrebnega za uvedbo novih izdelkov. Večino napak pa je bilo odpravljenih že pred proizvodnjo (Kaehler, brez datuma).

Tehnologija DT se ne uporablja samo v proizvodnji, temveč tudi v ostalih industrijah, kot so zdravstvo, energetika, gradbeništvo ter pametna mesta (Berko, 2025). V tabeli 1 so predstavljeni nekateri primeri uporabe DT v ostalih industrijah, skupaj z njihovimi prednostnimi ter podjetji, ki so to tehnologijo implementirala.

Tabela 1: Pregled uporabe digitalnih dvojčkov v različnih industrijah

Industrija	Uporaba	Prednosti	Primeri podjetij
Proizvodnja	Optimizacija pametne tovarne	Izboljšana učinkovitost, zmanjšan izpad, napovedno vzdrževanje	Siemens, General Electric
Zdravstvo	Simulacije zdravljenja, prilagojene pacientom	Osebnost prilagojena zdravstvena oskrba, zmanjšano poskusno zdravljenje	Philips, IBM Watson Health

se nadaljuje

Tabela 1: Pregled uporabe digitalnih dvojčkov v različnih industrijah (nad.)

Industrija	Uporaba	Prednosti	Primeri podjetij
Avtomobilska industrija	Virtualno prototipiranje in napovedno vzdrževanje	Hitrejši razvoj, prihranek stroškov, izboljšana zanesljivost vozil	Tesla, BMW
Letalstvo	Spremljanje zmogljivosti letal	Izboljšana varnost, zmanjšani stroški vzdrževanja, diagnostika v realnem času	Boeing, Airbus
Trgovina na drobno	Obvladovanje dobavne verige in zalog	Zmanjšanje odpadkov, izboljšano napovedovanje povpraševanja, optimizirana logistika	Walmart, Amazon
Energija	Pametna omrežja in spremljanje sredstev	Večja učinkovitost, nižji operativni stroški, optimizacija porabe energije v realnem času	Shell, Siemens Energy
Gradbeništvo	Modeliranje informacij o gradnji	Izboljšano načrtovanje projektov, zmanjšana tveganja v gradnji, optimizirana uporaba virov	Autodesk, Bentley Systems
Logistika	Optimizacija voznega parka in skladišč	Izboljšana učinkovitost poti, zmanjšani stroški goriva, izboljšana točnost dostave	DHL, FedEx
Farmacevtska industrija	Razvoj zdravil in simulacija kliničnih preizkusov	Hitrejša odkritja zdravil, nižji stroški raziskav in razvoja, optimizacija preizkusov	Pfizer, Novartis
Pametna mesta	Načrtovanje mest in obvladovanje infrastrukture	Izboljšani prometni tok, večja energetska učinkovitost, večja javna varnost	Singapore Smart Nation, IBM

Vir: prirejeno po Berko (2025).

5 IZZIVI IN OMEJITVE DIGITALNIH DVOJČKOV

Tehnologije IoT, UI in DT si delijo skupne izzive, kot so standardizacija podatkov, podatkovni management in varovanje podatkov. Napredki v katerikoli izmed teh tehnologij pa bodo posredno prispevali k reševanju izzivov DT (Attaran in drugi, 2024).

5.1 Tehnični izzivi

Eden od glavnih tehničnih izzivov pri uvajanju DT je zagotavljanje visoko zmogljive informacijske infrastrukture, ki mora vključevati ustrezno strojno in programsko opremo (Fuller in drugi, 2020). Algoritmi DT zahtevajo zmogljive grafične procesorje (angl. Graphics processing unit - GPU) za obdelavo kompleksnih simulacij in podatkovnih analiz, pri čemer strošek enega grafičnega procesorja lahko dosega več tisoč evrov. Alternativa

lastni strojni opremi so oblačne storitve, ki jih ponujajo podjetja, kot so Amazon Web Services, Google Cloud, Microsoft Azure in Nvidia Cloud (Fuller in drugi, 2020).

Implementacija DT v podjetje, ki še nima ostalih podpornih tehnologij, je lahko draga. Specifično to velja za majhna in srednja podjetja, saj bodo težje upravičila visoke začetne stroške tehnologije in iskanja ustreznega kadra (Berko, 2025). Dodaten izziv predstavlja tudi implementacija DT v stare proizvodne sisteme (Attaran in drugi, 2024), saj pogosto niso kompatibilni s potrebnimi tehnologijami (Fuller in drugi, 2020). Implementacija v tovrstnih primerih pa lahko vodi le v enosmerno komunikacijo (Cimino in drugi, 2019).

Velike količine naprav in podatkov lahko obremenijo trenutne omrežne sisteme, kar lahko pripelje do izpadov ali izgube podatkov (Wang in drugi, 2025). Podjetja morajo zagotoviti standardiziran robusten sistem, ki podpira pretok vseh podatkov iz različnih sistemov (Berko, 2025). Izzivi nastanejo tudi pri združevanju podatkov iz različnih sistemov, kjer vsak dodaten korak pri urejanju podatkov pomeni dodatne stroške, kar lahko vodi do potreb po dodatni procesorski moči (Attaran in drugi, 2024). Da bi se izognili takšnim težavam, morajo podjetja natančno načrtovati, koliko podatkov bo potovalo po omrežju, in zagotoviti zadostne zmogljivosti omrežja za obdelavo informacij (Fuller in drugi, 2020). Če podjetja nimajo dostopa do vseh potrebnih podatkov, morajo DT prilagoditi specifičnim uporabam, namesto da bi jih uporabljali kot univerzalno rešitev (Hu in drugi, 2024).

Modeliranje DT je specifično glede na njihovo uporabo, saj še ni vzpostavljen univerzalen model, ki bi bil primeren za vse industrije in vrste uporabe (Qi in drugi, 2021). Razširitev modela DT iz avtonomnih v celotne in velike kompleksne sisteme pa lahko s seboj prinese dodatne izzive, saj se z vsako dodatno komponento oteži obvladovanje in ustrezno delovanje DT (Hassija in drugi, 2024).

5.2 Poslovni izzivi

Pravni in regulativni okvir uporabe DT še ni povsem razvit, zlasti na področju UI in avtomatiziranega odločanja (Fuller in drugi, 2020). DT morajo biti obravnavani kot kritični sistemi, kjer je treba vzpostaviti varnostni protokol v zvezi s podatki. Organizacija mora imeti v mislih dva možna napada, fizičnega in digitalnega (Attaran in drugi, 2024).

Podjetja morajo biti previdna pri shranjevanju in obdelavi podatkov, saj lahko napačno ravnanje s podatki privede do uhajanja občutljivih informacij ali kršitev zakonodaje o varstvu podatkov (Fuller in drugi, 2020). Glede na uporabo so posebej občutljivi podatki, ki jih generirajo IoT-naprave, ki so na javnih ali pa zasebnih mestih. Zaradi velike količine teh naprav in neznanja uporabnikov pa je te naprave težje zavarovati in kontrolirati (Wang in drugi, 2025). Zagotavljanje varnosti pred kibernetскими napadi je ključno (Hassija in drugi, 2024). Predlogi za odpravo teh izzivov so ustvarjanje varnostnih strategij na podlagi simulacije napadov, dodajanje vodnih žigov ali dodajanje digitalnih podpisov in vzpostavitev kriptografskih funkcij (Lyu in drugi, 2024).

Implementacija DT je lahko povezana tudi z visokimi stroški, v primeru starih sistemov imamo poleg implementacije nove tehnologije tudi potrebo po obnovi obstoječih sistemov (Fuller in drugi, 2020). Investicija v DT ni samo enkratna, saj se morajo sistemi konstantno vzdrževati in posodabljati. V tem primeru morajo podjetja razmišljati o ustreznem kadru (Berko, 2025). Zaradi nenehnega razvoja tehnologije in padanja stroškov ključnih tehnologij, kot je IoT, pa se pričakuje, da bo implementacija DT v prihodnosti vedno bolj ugodna (Fuller in drugi, 2020).

Implementacija DT v industrije, kot sta farmacija ali živilska industrija, ki so pod pritiskom dodatnih regulacij, je lahko bolj kompleksna. Podjetja v tovrstnih industrijah se morajo prepričati, da bodo DT vključevali vse zahteve, specifične za njihovo industrijo, da se izognejo potencialnim sankcijam (Berko, 2025).

6 TRENDI IN PRIHODNOST DIGITALNIH DVOJČKOV

DT se vse bolj uveljavljajo kot ključna tehnologija v sodobni industriji, pri čemer njihov razvoj usmerjajo napredki na področju podatkovnih tehnologij, UI, IoT in računalniške simulacije. Prihodnje izboljšave bodo osredotočene na optimizacijo zmogljivosti, integracijo novih tehnologij in vzpostavitev univerzalnih standardov, ki bodo omogočili implementacijo DT v različnih industrijskih panogah (Qi in drugi, 2021).

Po analizi družbe McKinsey iz leta 2024 naj bi trg DT v prihodnjih letih rasel s povprečno letno stopnjo 60 %, pri čemer bi njegova vrednost dosegla 73,5 milijarde ameriških dolarjev. Dodatne projekcije podjetja Salesforce iz leta 2024 pa nakazujejo, da bi se lahko do leta 2032 skupna vrednost trga povzpela celo na 259,32 milijarde ameriških dolarjev.

6.1 Tehnični trendi

Zaradi vse cenejših senzorjev in komunikacijske tehnologije se pričakuje, da bo tehnologija DT postala vedno bolj popularna, saj bo omogočala vedno več možnosti, ki so bile v preteklih letih predrage (Lim in drugi, 2020). Glede na industrijo 5.0, kjer je človek v ospredju, pa lahko pričakujemo, da bodo pomembni podatki prihajali tudi iz teh virov (Abisset-Chavanne in drugi, 2025).

Ker DT temeljijo na hitri izmenjavi podatkov med fizičnimi in digitalnimi entitetami, bo nujno izboljšati prenos podatkov. Zaradi naraščajočih količin podatkov lahko v omrežjih nastajajo ozka grla in motnje v komunikaciji. Da bi se izognili tem težavam, se razvijajo visokozmogljivi usmerjevalniki, ki bodo omogočali poveztljivost z več milijoni naprav hkrati (Qi in drugi, 2021).

Eden izmed trendov je robno računalništvo, kjer se zmanjša odzivni čas, ker se podatki procesirajo bližje fizičnim napravam (Cimino in drugi, 2019). Prav tako je podjetje NVIDIA predstavilo 6G razvojno oblačno platformo, ki predstavlja naslednjo generacijo brezžične

komunikacije. Platforma bi omogočala medsebojne komunikacije bilijonov naprav. Glavni trije gradniki pa so DT 6G-omrežja, strojna oprema in Neuro-lan okvir za radijsko komunikacijo, ki optimizira radijske signale s pomočjo UI (Hassija in drugi, 2024).

V raziskavi Nacionalne akademije znanosti, inženirstva in medicine v Združenih državah Amerike (ZDA) iz leta 2024 je predlagano, da javne inštitucije razvijejo osnovne modele za vzpostavitev DT. Pod osnovne modele so specifikirali matematične, statistične in računalniške modele, ki bi morali biti dostopni tudi manjšim in srednjim podjetjem. Poudarili so tudi, da je pomemben razvoj algoritmov za namen zmanjšanja računalniških in podatkovnih zahtev.

6.2 Aplikacijski trendi

DT so predvideni tudi kot ena izmed ključnih tehnologij za industrijo 5.0, saj si delijo enako težo kot robno računalništvo, kolaborativni roboti, internet vsega, analitika masovnih podatkov, veriženje podatkov in 6G-omrežje (Maddikunta in drugi, 2022). Z vključevanjem UI in naprednih analitičnih metod pa bodo DT omogočili natančne simulacije in izboljšano napovedovanje prihodnjih stanj fizičnih sistemov (Hu in drugi, 2024). Različne storitve, kot je vzdrževanje, pa bi lahko potekale na daljavo (Ran in drugi, 2022).

Poleg že obstoječih industrij, kjer se DT pojavljajo, so potenciali za dodatne uporabe v drugih industrijah veliki. Raziskovalci so poudarili, da imajo DT potencial tudi v kmetijstvu, zabavi in računalniških igricah (Hassija in drugi, 2024). Prav tako se DT umeščajo kot ena od ključnih tehnologij, ki lahko podpirajo ustvarjanje industrijskega metaverzuma (Lyu in drugi, 2024).

Za namen lažjih aplikacij je bilo predlagano, da bi se ustvarila globalna partnerstva za izgradnjo podatkovnih baz, ki nudijo standardizacije, teste, modele, verifikacije in validacije. Namen partnerstva bi bil, da lahko tudi ostala podjetja dostopajo do podatkov in jih uporabijo v svojih DT (Jin in drugi, 2024)

Podjetja so glede na raziskave iz novembra 2023 primarno implementirala DT za namene doseganja ciljev trajnosti. Med največje prodajalce DT-tehnologije pa so spadali tehnološki velikani, kot so Siemens, Bosch, Microsoft, Amazon, Google in drugi. Sestavljena letna stopnja rasti za od leta 2023 do 2028 pa je ocenjena na 30 % (Hasan, 2023). V prihodnosti se pričakuje, da bodo industrije, še posebej tiste, ki temeljijo na ogromno podatkih, začele uporabljati DT za doseganje detajlnih operativnih vpogledov (Anderson, 2024).

McKinsey je v letu 2022 naredil raziskavo višjih vodstvenih kadrov v industrijah, kjer so identificirali dve glavni skrbi, ki jih imajo (Camarella in drugi, 2024):

- povečevanje stroškov z vidika materiala in pomanjkanje ustreznega kadra ter

- željo po višjem operativnem vpogledu skozi boljše napovedi potreb, procesiranje zalog in proizvodne fleksibilnosti.

McKinseyjeva anketa je pokazala, da se 86 % višjih vodstvenih kadrov strinja, da bi lahko tehnologija DT odpravila te skrbi (Camarella in drugi, 2024). Primer uporabe je tudi uporaba DT za organizirane specializirane sejme, razstave ali interne dogodke, ki jih je Slovenija izkoristila na svetovni razstavi v Dubaju, kjer so v virtualnem okolju obiskovalcem omogočili doživetja vsebin iz fizičnega okolja, hkrati pa celoten dogodek prenašali v živo prek DT (Imago, 2024).

6.3 Regulativni in etični trendi

Eden izmed načinov varovanja podatkov posameznikov ali podjetij, pridobljenih s tehnologijami, je implementacija rešitev tehnologije veriženja blokov (Geng in drugi, 2025). Integracija DT s tehnologijo veriženja blokov na osnovi ethereuma bi lahko nudila boljšo transparentnost pri ravnanju z občutljivimi podatki (Attaran in drugi 2024).

Podjetja se morajo pri implementaciji in obvladovanju DT držati globalnih regulativ, kot so Splošna uredba o varstvu podatkov in zakoni o zasebnosti potrošnikov. V primeru vključevanja ostalih podjetij v DT kot v primeru dobaviteljev je treba imeti nepristranske algoritme, da ne pride do diskriminacijskega vedenja do manjših dobaviteljev ali pa do določenih regij in držav (Bernd, 2025).

V raziskavi ameriške Nacionalne akademije znanosti, inženirstva in medicine iz leta 2024 pa poudarjajo, da je zaradi vse bolj tesne povezave med fizičnim in digitalnem okoljem kibernetika varnost še bolj pomembna, kot je bila v preteklosti. Širjenje modela DT brez konkretnih standardov in smernic pa je lahko nevarno. Njihovi predlogi zajemajo razvijanje ustreznih smernic na tem področju ter nujnost zasedanj med industrijami in akademiki, kjer bi se dotaknili tudi možnosti ustvarjanja interdisciplinarnih izobraževanj na to tematiko.

7 SKLEP

Razvoj DT je v zadnjem desetletju doživel izjemen napredek, zahvaljujoč razvoju ključnih tehnologij in njihovemu izpopolnjevanju. Koncept DT omogoča podjetjem koristiti podatke, ki jih masovno generirajo, in jih na enostaven način uporabiti za namen vizualizacije, simulacije in optimizacije fizičnih sistemov, kar jim odpira možnosti za napovedovanje napak, izboljšanje kakovosti izdelkov, učinkovitejše obvladovanje virov in višji operativni vpogled. V nalogi smo se osredotočili na teoretične osnove DT, njihovo tehnološko infrastrukturo orodij, povezanih z implementacijo, primere iz prakse, prednosti, izzive in trende.

Pregled literature je pokazal, da DT postajajo ključen element industrije 4.0, njihova ključna prednost pa je sposobnost sprotnega spremljanja, simuliranja in optimizacije fizičnih

sistemov brez potrebe po fizičnih posegih. To podjetjem prinaša neposredno ekonomsko korist. Poleg tega pa so DT močno uporabljeni na začetnih stopnjah obvladovanja življenjskega cikla izdelka, saj se lahko hitro prilagajajo spreminjajočim se razmeram. Podjetja s pomočjo simulacij in analize podatkov hitro najdejo optimalne rešitve.

Kljub številnim prednostim predstavlja implementacija DT veliko izzivov, predvsem zaradi visokih začetnih stroškov, kompleksnosti integracije s starimi sistemi in stroji ter pomanjkanja standardizacije in regulacij. Izzivi se pojavljajo tudi pri varnosti podatkov z vidika njihove zaščite, še posebej, če so podatki zajeti iz javnih prostorov ali pa vsebujejo občutljive podatke ter se tičejo kibernetske varnosti. Poleg tega obstajajo tudi organizacijske ovire, saj podjetja potrebujejo ustrezno usposobljen kader za implementacijo tehnologije. Izzivi so toliko večji za majhna in srednja podjetja.

Prihodnost DT je povezana z razvojem prihodnjih industrijskih standardov, kot je industrija 5.0, kjer se pričakuje, da bodo DT ostali ključna komponenta. Pričakovati pa je, da se bo tehnologija širila še na več industrij, kot se že kaže v raziskavah in strokovnih člankih. Trendi bodo vključevali še močnejšo uporabo ključnih tehnologij, njihov razvoj pa bo hkrati vplival na razvoj DT.

Glede na ugotovitve naloge bi bilo po našem mnenju smiselno nadaljevanje raziskave usmeriti v izpopolnjevanje algoritmov in metod obvladovanja DT, kot je predlagala tudi ameriška nacionalna akademija. Prav tako je predlagala, da bi bilo smiselno razviti skupne podatkovne baze, kjer lahko ostala podjetja za njihovo implementacijo uporabijo že vnaprej generirane modele.

Poleg predloga ameriške nacionalne akademije in na podlagi raziskovalnih člankov bi dodali, da se morajo prihodnja raziskovanja osredotočati tudi v smeri razvijanja DT kot podpornega sistema za doseganje ključnih kazalcev uspešnosti in postavljanje ciljev ter ključnih rezultatov. DT naj glede na realnočasovne podatke, zgodovinske podatke in s pomočjo simulacij pomagajo postaviti cilje na način, da so za podjetje lažje dosegljivi in realistični. DT pa lahko posledično podjetjem tudi pomagajo spremljati doseganje rezultatov in vzroke v primeru nedoseganja. Prav tako pa lahko podpirajo podjetja s prilagajanjem parametrov in celotnih sistemov prek nadziranja fizičnih objektov za pomoč njihove realizacije.

Kljub izzivom je jasno, da se bo uporaba tehnologije v prihodnosti le povečevala in bodo DT postali standardna tehnologija za izboljšave in usmeritve. Še posebej zanimivo bo spremljanje uporabe DT v drugih industrijah, ki nam bodo potencialno lahko spremenile vsakodnevni način življenja.

SEZNAM KLJUČNE LITERATURE

1. Attaran, S., Attaran, M. in Celik, B. G. (2024). Digital Twins and Industrial Internet of Things: Uncovering operational intelligence in industry 4.0. *Decision Analytics Journal*, 10, 100398. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100398>
2. Bao, J., Guo, D., Li, J. in Zhang, J. (2018). The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing. *Enterprise Information Systems*, 13(4), 1–23. <http://dx.doi.org/10.1080/17517575.2018.1526324>
3. Fuller, A., Fan, Z., Day, C. in Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
4. Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L. in Nee, A. Y. C. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>
5. Tao, F., Zhang H., Liu, A. in Nee, A.Y.C. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>

LITERATURA IN VIRI

1. Abdelraham, M., Macatulad, R., Lei, B., Quintana, M., Miller, C. in Biljecki, F. (2025). What is a Digital Twin anyway? Deriving the definition for the built environment from over 15,000 scientific publications. *Building and Environment*, 274, 112748. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112748>
2. Abisset-Chavanne, E., Coupaye, T., Golra, F. R., Lamy, D., Piel, A., Scart, O. in Vicant-Blanc, P. (2024). A Digital Twin use cases classification and definition framework based on Industrial feedback. *Computers in Industry*, 161, 104113. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.104113>
3. Al-Dulaimy, A., Jansen, M., Johanson, B., Trivedi, A., Iosup, A., Ashjaei, M., Galleta, A., Kimovski, D., Prodan, R., Tserpes, K., Kousioris, G., Giannakos, C., Brandic, I., Ali, N., Bondi, A. in Papadopoulus, A. V. (2024). The computing continuum: From IoT to the Cloud. *Internet of things*, 27, 101272. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101272>
4. Anderson, A. (2024, 12. maj). *Digital Twins In Decison-Making: Reaping the Benefits and Overcoming The Challenges*. <https://www.forbes.com/councils/forbestech/council/2024/03/12/digital-twins-in-decision-making-reaping-the-benefits-and-overcoming-the-challenges/>
5. Berko, L. O. (2025). Advanced supply chain analytics: Leveraging digital twins, IoT and blockchain for esilient, data-driven business operations. *World Journal of Advanced Research*, 25(02), 1777–1799. <http://dx.doi.org/10.30574/wjarr.2025.25.2.0572>

6. Camarella, S., Conway, M. P., Goering, K. in Huntington, M. (2024, 10. januar). *Digital twins are revolutionizing how decisions are made within factories, and forward-thinking manufacturers are getting ahead of the technology curve to drive efficiency*. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-next-frontier-of-factory-optimization>
7. Cimino, C., Negri, E. in Fumagalli, L. (2019). Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in industry*, 113, 103130. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.103130>
8. Fu, X., Song, H., Li, S. in Lu, Y. (2025). Digital twin technology in modern machining: A comprehensive review of research on machining errors. *Journal of Manufacturing Systems*, 79, 134–161. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2025.01.005>
9. Geng, C., Zhang, Y., Xu, X., Yao, Y., Lu, C. in Zhi, Z. (2025). Blockchain-based identity authentication and data interaction scheme for the Industrial Internet of Things. *Computers and Electrical Engineering*, 123, 110143. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2025.110143>
10. Hasan, M. (2023, 15. november). *Digital twin market: Analyzing growth and emerging trends*. <https://iot-analytics.com/digital-twin-market-analyzing-growth-emerging-trends/>
11. Hassija, V., Chamola, V., De, R., Das, S., Chakrabarti, A., Sangowan, K. S. in Pandey, A. (2024). A Survey on Digital Twins: Enabling Technologies, Use Cases, Application, Open Issues and More. *IEEE Journal of Selected Areas in Sensor*, 1–27. <http://dx.doi.org/10.1109/JSAS.2024.3523856>
12. Hu, S., Li, C., Li, B., Yang, M., Xiaoming, W., Gao, T., Xu, W., Dambatta, Y. S., Zhou, Z. in Xu, P. (2024). Digital Twins Enabling Intelligent Manufacturing: From Methodology to Application. *Intelligent and Sustainable Manufacturing*, 1(1). <https://doi.org/10.35534/ism.2024.10007>
13. IBM. (2021, 5. avgust). *What is digital twin?* <https://www.ibm.com/think/topics/what-is-a-digital-twin>
14. Imago. (2024, 18. september). *3D digitalni dvojček*. <https://www.imago.si/2024/09/18/digitalni-dvojcek/>
15. Iskraemeco. (2024, 28. marec). *Iskraemeco uspešno zaključil razvojni projekt digitalizacije 'Digitalni dvojček za Digital Lean'*. <https://iskraemeco.com/sl/novice/iskraemeco-uspesno-zakljucil-razvojni-projekt-digitalizacije-digitalni-dvojcek-za-digital-lean/>
16. Jin, L., Zhai, X., Wang, K., Zhang, K., Wu, D., Nazir, A., Jiang, J. in Liao, W. H. (2024). Big data, machine learning, and digital twin assisted additive manufacturing: A review. *Materials & Design*, 244, 113086. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113086>
17. Jin, T., Sun, Z., Li, L., Zhang, Q., Zhu, M., Zixau, Z., Yaun, G., Chen, T., Tian, Y., Hou, X. in Lee, C. (2020). Triboelectric nanogenerator sensors for soft robotics aiming at digital twin applications. *Nature Communications*, 11, 5381. <https://www.nature.com/articles/s41467-020-19059-3>

18. Kaehler, G. (brez datuma). *TrainSim: A digital vehicle twin of a train*. <https://www.ni.com/de/solutions/industrial-machinery/case-studies/trainsim-digital-vehicle-twin-train.html?srsltid=AfmBOopecEUv2-DUEZICfSmPCVLig41T8bl1BIsPvhSrEuZDSIIc7yN>
19. Lang, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q. in Chen, X. (2021). Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 119-137. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.011>
20. Liao, Y., Lee, H. in Ryu, K. (2018). Digital Twin Concept for Smart injection molding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 324, 012077. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/324/1/012077>
21. Lim, K. Y. H., Zheng, P. in Chen, C. H. (2020). A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. *Journal of intelligent Manufacturing*, 31, 1313-1337. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10845-019-01512-w>
22. Lubber, M., Wagner, S., Wegmann, M. in Schlip, J. (2025). Concept of a plug-and-play, Machine learning Digital Twin of the production resource for Detailed Capacity Planning and Scheduling. *Procedia Computer Science*, 253, 1266–1275. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.01.188>
23. Luo, W., Hu, T., Ye, Y., Zang, C., Wei, Y. (2020). A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by Digital Twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 65, 101974. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101974>
24. Lyu, Z. in Fridenfalk, M. (2024). Digital twins for building industrial metaverse. *Journal of Advanced Research*, 66, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2023.11.019>
25. Maddikunta, P. K. R., Pham, Q. V., Prabadevi, B., Deppa, N., Dev, K., Gadekallu, T. R., Ruby, R. in Liyanage, M. (2022). Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. *Journal of Industrial Information Integration*, 22, 100257. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100257>
26. McKinsey. (2024, 26. avgust). *What is digital—twin technology?*. <https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-is-digital-twin-technology>
27. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2024). *Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins*. <https://doi.org/10.17226/26894>
28. Ojstersek, R., Javernik, A. in Buchmaier, B. (2023). Optimizing smart manufacturing systems using digital twin. *Avances in production engineering*, 18(4), 475–485. <http://dx.doi.org/10.14743/apem2023.4.486>
29. Ran, W., Hu, Y. in Zhi, Y. (2022). *Application of Digital Twins to Flexible Production Management: Taking a Shandong Factory as an Example*. <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-1232905/v1>
30. Salesforce (2024, 1. november). *Digital Twin: Definition + Benefits*. [objava na blogu]. <https://www.salesforce.com/au/blog/digital-twin/>

31. Semeraro, C., Lezoche, M., Panneto, M. in Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103469>
32. Soleymanizadeh, H., Qu, Q., Bamakan, S. M. H., Zanjirichi, S. M. (2023). Digital Twin Empowering Manufacturing Paradigms: Lean, Agile, Just-in-Time (Jit), Flexible, REsilience, Sustainable. *Procedia Computer Science*, 221, 1258–1267. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.08.114>
33. Toyota Europe. (2023, 22. avgust). *Our manufacturing companies have digital twins*. <https://www.toyota-europe.com/news/2023/our-manufacturing-companies-have-digital-twins>
34. Wang, J., Lieu, Z., Yang, X., Li, M. in Lyu, Z. (2025). The internet of Things under Federated Learning: A review of the Latest Advances and applications. *Computers, materials and Continua*, 82(1), 1–39. <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.058926>