

asist. dr. Mateja Držecnik, univ. dipl. inž. grad.
mateja.drzecnik@um.si
mateja.drzecnik@gic.si



red. prof. dr. Uroš Klanšek, univ. dipl. gosp. inž.
uros.klansek@um.si
Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo
Smetanova 17, 2000 Maribor



dr. Tjaša Zupančič Hartner, prof. biol. in kem.
tjasa.zh@gic.si



dr. Rok Cajzek, mag. gosp. inž.
rok.cajzek@gic.si
GIC GRADNJE d.o.o.
Sv. Florijan 120, 3250 Rogaška Slatina



Pregledni znanstveni članek
UDK/UDC: 658.5:666.97:004.94

NAPREDNO UPRAVLJANJE BETONARN S PODPORO DIGITALNIH DVOJČKOV

ADVANCED CONCRETE PLANT MANAGEMENT WITH THE SUPPORT OF DIGITAL TWINS

Povzetek

Članek predstavlja najnovejše stanje tehnike na področju naprednega upravljanja betonarn s podporo digitalnih dvojčkov (angl. Digital Twins, DT), s poudarkom na povezovanju senzorskih podatkov, spremljanju procesov v realnem času, napovednem vzdrževanju, simulacijah delovanja in usposabljanju v kontekstu razvoja Industrije 4.0. Za zagotavljanje ažurnega virtualnega modela betonarne, tj. njenega DT, se kontinuirano zbirajo potrebni podatki iz številnih sistemskih komponent. Računalniška analitika, ki podpira DT betonarne in se napaja s podatki v realnem času, omogoča hitre prilagoditve v proizvodnem procesu, kar izboljšuje učinkovitost in zmanjša količino odpadkov. DT betonarne tako služi tudi kot učinkovito orodje za usposabljanje strokovnjakov, saj omogoča preizkušanje različnih scenarijev brez tveganja za dejanski obrat. Poleg tega DT izboljša preglednost delovanja in predvidljivost vzdrževanja betonarne ter poveča njeno operativno učinkovitost, kar vodi do znižanja stroškov in doseganja višjih nivojev kakovosti poslovanja. Prispevek poudari vlogo DT pri preoblikovanju tradicionalnih proizvodnih procesov, kot je proizvodnja betona, in podaja reprezentativen dejanski primer srednje velike betonarne, ki s podporo DT kaže napredek pri upravljanju tovrstnih proizvodnih obratov.

Ključne besede: betonarne, digitalni dvojčki, Industrija 4.0, spremljanje procesov, vzdrževanje, simulacije, usposabljanje.

Summary

The article presents the latest state of the art in the field of advanced management of concrete plants with the support of digital twins (DT). Here, the discussion focuses on sensor data integration, real-time process monitoring, predictable maintenance, operation simulations and training in the context of the development of Industry 4.0. For the purpose of providing a constantly up-to-date virtual model of the concrete plant, i.e. of its DT, the necessary data is continuously collected from several system components. Computer analytics, which supports the DT of the concrete plant and is fed with real-time data, enables rapid adjustments in the production process, thus increasing its efficiency and reducing the amount of waste. With such characteristics, the DT of the concrete plant can also serve as an effective tool for training professionals, making it possible to deal with various scenarios without risk. In addition, the DT improve the transparency of operations and the predictability of concrete plant maintenance and increase its operational efficiency, which in turn leads to a reduction in costs and the achievement of higher levels of business quality. The article emphasizes the role of DT in the development of traditional manufacturing processes, such as concrete production. A representative example of an actual medium-sized DT-supported concrete batching plant is given, showing advances in the management of such a production facility.

Key words: concrete plants, digital twins, Industry 4.0, process monitoring, maintenance, simulations, training.

1 UVOD

Četrta industrijska revolucija, poznana kot Industrija 4.0, opredeljuje aktualno obdobje sprememb v gospodarstvu, zlasti v proizvodnem sektorju, ki ga poganjajo nove digitalne tehnologije, kot so internet stvari (angl. Internet of Things, IoT), množični podatki (angl. Big Data, BD), umetna inteligenca (angl. Artificial Intelligence, AI), strojno učenje (angl. Machine Learning, ML), kibernetski fizični sistemi (angl. Cyber-Physical Systems, CPS) in digitalni dvojčki (angl. Digital Twins, DT).

Industrija 4.0 temelji na konceptu IoT, ki z uporabo integriranih senzorjev, programske opreme in komunikacijskih omrežij omogoča povezljivost ter medsebojno interakcijo različnih naprav v proizvodnih procesih. IoT omogoča zajemanje in prenos podatkov v realnem času, kar predstavlja temelj za učinkovito spremljanje in optimizacijo proizvodnje ([Yang, 2018], [Liu, 2022], [Noor-A-Rahim, 2023]). Omenjena orodja zagotavljajo v kombinaciji z DT in AI napredne analitične metode, ki izboljšujejo odločanje, zmanjšujejo napake in povečujejo proizvodno učinkovitost ([Pan, 2021], [Rathore, 2021]).

Tehnologije strojnega učenja v okviru Industrije 4.0 dodatno nadgrajujejo to povezljivost, saj omogočajo razvoj naprednih napovednih modelov za avtomatizacijo proizvodnih procesov ter proaktivno preprečevanje nezaželenih zaustavitev naprav ali proizvodnih sistemov ([Baduge, 2022], [Nguyen, 2023]). Z uporabo teh pristopov se izboljšuje učinkovitost dela, zagotavlja optimalno razporejanje virov in zmanjšujejo se stroški vzdrževanja zaradi boljšega predvidevanja okvar.

CPS združujejo fizične in digitalne entitete v inteligentna proizvodna okolja, ki omogočajo samoregulacijo in prilagajanje delovnih pogojev glede na sproti pridobljene podatke. Sinergija med fizičnim in digitalnim omogoča izvajanje simulacij, ki izboljšujejo zanesljivost proizvodnje ter zmanjšujejo stroške razvoja novih izdelkov. Kljub tem prednostim Industrija 4.0 prinaša izzive, kot so potreba po sofisticiranih varnostnih protokolih in zagotavljanju usposobljenosti kadra za delo z novimi tehnologijami [Alshammari, 2021]. Kibernetska varnost ostaja ključni izziv, saj industrijski sistemi postajajo vedno bolj povezani in izpostavljeni napadom ([Bhamare, 2020], [Raj, 2023]).

Koncept DT, prvotno razvit za vesoljsko industrijo [Grieves, 2016], se je zaradi svoje uporabnosti hitro razširil v druga področja industrije, vključno z gradbeništvom. DT so danes pomembna gonilna sila Industrije 4.0. So natančne digitalne replike fizičnih obratov, sistemov ali procesov, ki omogočajo simulacijo, analizo in optimizacijo njihovega delovanja v realnem času [Tao, 2019]. Tehnologija temelji na podatkih, ki jih zbirajo IoT-senzorji in jih nato AI ter analitična orodja obdelajo za izboljšanje napovedovanja stanja sistemov, preprečevanje okvar kakor tudi optimizacijo proizvodnje ([Pan, 2021], [Javaid, 2023]).

DT predstavljajo napredno tehnološko rešitev, ki omogoča bistvene izboljšave v gradbeni industriji, ki se tradicionalno sooča z nizko produktivnostjo in visokimi stroški proizvodnje. Integracija DT-tehnologij omogoča rešitve za optimizacijo procesov, zmanjšanje odpadkov in povečanje energetske učinkovitosti, kar prinaša tako ekonomske kot okoljske koristi [Opoku, 2021]. Napredne DT-rešitve omogočajo napovedno vzdrževanje in zaznavanje nepravilnosti v konstrukcijah v realnem času. To

zmanjšuje tveganja na gradbiščih in bistveno izboljšuje splošno varnost pri delu ([Chen, 2023], [Torzoni, 2024]). Sistemi DT denimo lahko integrirajo senzorje in napredne analitične algoritme, ki zaznavajo anomalije na gradbišču v realnem času, s čimer izboljšajo možnosti pravočasnega ukrepanja za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev pri delu [Wang, 2022]. Poleg tega omogočajo vključitev pristopa informacijskega modeliranja zgradbe (angl. Building Information Modelling, BIM), kar pripomore k boljšemu nadzoru in upravljanju celotnega življenjskega cikla objektov [Begić, 2024].

Integracija DT v gradbeno industrijo zahteva obravnavo več izzivov, vključno s potrebo po standardizaciji podatkov, zagotavljanjem kibernetske varnosti ter interoperabilnostjo med različnimi digitalnimi rešitvami [Omrany, 2023]. Da bi premagali te izzive, raziskovalci predlagajo uporabo standardiziranih podatkovnih formatov, semantičnega modeliranja ter robustnih sistemov za upravljanje podatkov, ki zagotavljajo točnost in zanesljivost informacij [Dai, 2024]. DT v betonarnah predstavljajo ključno orodje za napredno upravljanje in optimizacijo proizvodnje betona. Senzorski podatki zagotavljajo spremljanje procesov v realnem času, napovedno vzdrževanje in simulacije delovanja, kar izboljšuje učinkovitost ter zmanjšuje količino odpadkov [Sacks, 2020]. Takšni digitalni modeli omogočajo tudi izobraževanje strokovnjakov brez tveganja in povečujejo transparentnost ter predvidljivost proizvodnje. DT tako izboljšujejo operativno učinkovitost in znižujejo stroške poslovanja, s tem pa prispevajo k trajnostnemu razvoju industrije.

Vendar pa vpeljava DT v gradbeno industrijo ni brez izzivov. Integracija kompleksnih informacijskih sistemov, skladnost z varnostnimi standardi in varovanje podatkov pri uvedbi DT v prakso odpirajo tako tehnična kot operativna vprašanja, katerih odgovori terjajo skrbno načrtovanje. Ključna področja, ki zahtevajo poglobljeno obravnavo, vključujejo integracijo, interoperabilnost, natančnost, popolnost, zasebnost in varnost podatkov; razširljivost in kompleksnost samega sistema; ter njegovo upravljanje in vzdrževanje [Omrany, 2023]. Da bi premagali omenjene izzive, raziskovalci predlagajo vključevanje standardiziranih formatov podatkov, protokolov in aplikacijskih programskih vmesnikov (angl. Application Programming Interface, API) za brezhibno sodelovanje entitet sistema; semantično modeliranje podatkov in ontologij za integracijo podatkov; ter izvajanje postopkov validacije in robustnega upravljanja podatkov, da se zagotovi točnost ([Alshammari, 2021], [Han, 2023], [Držečnik, 2025a]).

Kljub obširni literaturi o DT v gradbeništvu pa je konkretna obravnava njihove uporabe v betonarnah še vedno redka. Večina znanstvenih prispevkov se osredotoča bodisi na splošne koristi DT v proizvodnih ali infrastrukturnih sistemih bodisi na gradbene objekte z visoko stopnjo digitalizacije, kot so pamentne stavbe. Sistematizirane analize, ki bi identificirale najprimernejše procese za digitalizacijo v okviru DT prav v betonarnah, pogosto manjkajo ali pa so razdrobljene, nepovezane ali preveč splošne, zato ne omogočajo enotne in aplikativne presoje primernih digitalnih rešitev za tovrstna proizvodna okolja.

Nedavne raziskave ([Omrany, 2023], [Jahangir, 2024]) sicer prikazujejo potencial DT za podporo »mehkim« (angl. lean) pristopom – tj. vitkemu načinu vodenja proizvodnje, ki temelji na zmanjševanju izgub, neprestanem izboljševanju procesov ter povečanju učinkovitosti z minimalno porabo virov. V tem

kontekstu lahko DT služijo kot orodje za sprotno spremljanje, analizo in optimizacijo procesov v realnem času, kar neposredno podpira cilje vitke proizvodnje. Kljub temu pa omenjene študije pogosto ostajajo na konceptualni ravni in ne ponujajo dovolj konkretnih smernic za implementacijo DT-rešitev v realna, kompleksna proizvodna okolja, kot so betonarne, ki imajo specifične tehnološke zahteve in omejitve.

Posledično v znanstveni literaturi primanjkuje strukturiranih modelov in prilagojenih strategij, ki bi podjetjem v industriji betona omogočali učinkovito načrtovanje, uvajanje ter dolgoročno vzdrževanje DT-tehnologij. Nadaljnje raziskovanje, ki se osredotoča na identifikacijo konkretnih procesov, merljivih kazalnikov uspešnosti ter integracijskih zahtev digitalne transformacije v betonarnah, je zato nujno. Le z razvojem sistemskih, znanstveno utemeljenih pristopov bo mogoče zagotoviti učinkovito uvedbo digitalnih orodij v tovrstna specializirana proizvodna okolja ter s tem prispevati k njihovi večji odpornosti, operativni učinkovitosti in trajnostni usmerjenosti v času industrijskih preobrazb.

Za uspešno implementacijo DT v betonarnah je ključna usmeritev v konkretne koristi, kot so: povečana zanesljivost opreme, zmanjšanje proizvodnih izgub, izboljšano vzdrževanje ter

optimizacija porabe energije in materialov. Kot izpostavljata avtorja ([Jahangir, 2024], [Broo, 2023]), je pri uvedbi DT nujno zagotoviti ustrezno podatkovno infrastrukturo, kadrovske usposobljenosti ter jasno opredeljene cilje in pričakovane koristi. Poleg tega je pomembno, da se DT ne uvede kot samostojen digitalni projekt, temveč kot del širše digitalne strategije celotnega podjetja. Uvajanje mora biti postopno, začenši s pilotnimi primeri (npr. spremljanje stanja mešalnika ali porabe energije), ter podprto z jasnimi kazalniki uspešnosti, ki omogočajo vrednotenje vpliva DT na učinkovitost in trajnost proizvodnje.

Na podlagi pregleda literature in izkušenj iz prakse smo identificirali ključna področja v betonarni, kjer je implementacija DT posebno smiselna in izvedljiva. Ti procesi so prikazani v Preglednici 1, ki predstavlja strnjen pregled reprezentativne znanstvene literature, ki se nanaša na uporabo DT v ključnih procesih betonarne. Namen pregleda je prikazati, kako DT prispevajo k izboljšanju različnih vidikov delovanja betonarne, kot so spremljanje stanja opreme, upravljanje receptur, optimizacija materialnih tokov, energetska učinkovitost, napovedno vzdrževanje, zagotavljanje varnosti, usposabljanje kadra ter strateško odločanje. Za vsak proces so navedeni možni učinki implementacije DT, skupaj z referencami iz literature, ki

Proces v betonarni	Možni učinki implementacije DT	Viri
Spremljanje stanja opreme	Realno časovno spremljanje stanja naprav, zgodnje zaznavanje okvar, boljša diagnostika.	([Werner, 2019], [Schröder, 2016])
Priprava in nadzor receptur mešanja	Optimizacija mešanja z uporabo simulacij, avtomatizacija glede na pogoje okolja.	([Tekinerdogan, 2020], [Uhlemann, 2017])
Upravljanje materialnih tokov	Vizualizacija tokov materialov, napoved zalog, optimizacija logistike.	([Omran, 2023], [Weerapura, 2023], [VDMA, 2015])
Izboljševanje energetske učinkovitosti	Spremljanje porabe energije, simulacija energetskih scenarijev, zmanjšanje izgub, manjši CO ₂ -odtis.	([Arbizzani, 2023], [Javaid, 2023], [Rüßmann, 2015])
Napovedno vzdrževanje opreme	Predikcija napak, zmanjševanje zastojev, nižji stroški vzdrževanja.	([Chen, 2023], [van Dinter, 2022], [Werner, 2019], [Schröder, 2016])
Upravljanje varnostnih opozoril	Prikaz nevarnih območij, sinhronizacija opozoril, simulacija kriznih scenarijev.	([Wang, 2021], [Liu, 2022], [Wang, 2022])
Usposabljanje in razvoj kadra	Virtualno usposabljanje, vadbene simulacije, hitrejši prenos znanja.	([Broo, 2023], [Tao, 2018])
Analiza proizvodnih trendov	Odkrivanje trendov, odstopanj, podpora strateškemu odločanju.	([Rathore, 2021], [Tekinerdogan, 2020])
Optimizacija proizvodne učinkovitosti	Identifikacija izgub, stalno izboljševanje, podpora vitkim metodam »lean methods«*.	([Omran, 2024], [Jamwal, 2022], [Sacks, 2020], [Bischoff, 2015])
Zagotavljanje kakovosti in standardiziranje delovnih postopkov	Vzpostavitev standardnih postopkov, enotna baza znanja, sledljivost procesov, povezanost z BIM/ERP.	([Jahangir, 2024], [Nguyen & Adhikari, 2023], [Sacks, 2020], [Schröder, 2016], [Wang, 2022],)

Preglednica 1. Strnjen pregled reprezentativne znanstvene literature glede možnih učinkov implementacije DT v proizvodne procese betonarne.

podpirajo te ugotovitve. S tem preglednica ponuja zgoščen vpogled v trenutno stanje raziskav na področju digitalizacije betonarn in ponuja osnovo za razumevanje, kje in kako DT lahko ustvarjajo dodano vrednost v industrijski praksi. Pregled služi kot podpora pri nadaljnjem razmisleku o uvedbi digitalnih tehnologij v proizvodno okolje in odpira prostor za razpravo o potencialih ter usmeritvah nadaljnjega razvoja.

Koristi DT za gradbeništvo kakor tudi nasploh, kljub omenjenim izzivom, še vedno odtehtajo njihovo uvedbo in uporabo. Pričujoči članek se osredotoča na področje naprednega upravljanja betonarn s podporo DT, s poudarkom na povezovanju senzorskih podatkov, spremljanju procesov v realnem času, napovednem vzdrževanju, simulacijah delovanja in usposabljanju v kontekstu razvoja Industrije 4.0. Za namen zagotavljanja nenehno ažurnega virtualnega modela dejanske betonarne, tj. njenega DT, se ves čas zbirajo potrebni podatki iz številnih sistemskih komponent. Računalniška analitika, ki podpira DT betonarne in se napaja s podatki v realnem času, omogoča hitre prilagoditve v proizvodnem procesu, ki tako povečajo njegovo učinkovitost in zmanjšajo količino odpadkov. S takšnimi lastnostmi lahko DT betonarne služi tudi kot učinkovito orodje za usposabljanje strokovnjakov, s katerim je možno obravnavati različne scenarije brez tveganja. Poleg tega DT izboljša preglednost delovanja in predvidljivost vzdrževanja betonarne ter poveča njeno operativno učinkovitost, kar vodi do znižanja stroškov in doseganja višjih nivojev kakovosti poslovanja.

Prispevek poudari vlogo DT pri razvoju tradicionalnih proizvodnih procesov, kot je proizvodnja betona. Podan je reprezentativen primer dejanske srednje velike betonarne, podprte z DT, ki prikazuje napredek pri upravljanju tovrstnih obratov in vlogo integracije DT z obstoječimi informacijskimi sistemi, kar dodatno izboljša celovito upravljanje proizvodnih procesov.

2 UČINKI UVEDBE DIGITALNEGA DVOJČKA V BETONARNO

DT, kot ena izmed omogočitvenih tehnologij, postaja čedalje bolj pomembna za gradbeno proizvodnjo, zlasti v betonarnah, kjer sodobno poslovanje zahteva učinkovite proizvodne procese in vrhunsko kakovost izdelkov. Kakor je bilo že omenjeno, gre pri DT za virtualno upodobitev fizičnih objektov ali sistemov, denimo betonarn, o katerih je tukaj govora, kar omogoča povezovanje digitalnega in fizičnega sveta. Povezava med fizičnim sistemom in DT se vzpostavi s pomočjo senzorjev, ki omogočajo sprotno zbiranje podatkov o stanju in pogojih v betonarni. Ti podatki se nato uporabijo za ustvarjanje virtualnega modela, ki natančno odraža trenutne pogoje in stanje fizičnega sistema betonarne ter omogoča izvedbo natančnih simulacij njenega delovanja, kar prispeva k boljšemu razumevanju in upravljanju dejanske proizvodnje betona in betonskih (pol)izdelkov. Na ta način lahko podjetja prepoznajo in odpravijo težave v proizvodnji, optimizirajo porabo materiala in energije ter tako pomembno prispevajo k trajnostnemu razvoju, saj omogočajo bolj smotno uporabo virov, kar zmanjšuje ekološki odtis betonarne in zagotavlja večjo okoljsko učinkovitost celotnega proizvodnega procesa [van Dinter, 2022].

DT v betonarnah pokrivajo celoten cikel nastajanja betonskih proizvodov, od vhodnih surovin do končnega izdelka. Ta digitalna tehnologija omogoča simulacijo različnih betonskih

mešanic za potrebe izbora optimalnih vhodnih materialov in zagotavljanja skladnosti s standardi kakovosti. Integracija senzorjev in napredne analitike nudi možnost odkrivanja napak v sestavinah ali v procesu mešanja v realnem času, kar prispeva k hitrejšemu ter učinkovitejšemu odzivu na težave [Uhlemann, 2017]. Uporaba DT neposredno vpliva na nivo kakovosti končnih izdelkov betonarn, saj dopušča simulacijo in testiranje različnih mešanic v virtualnem okolju ter predhodno oceno lastnosti betona, kot so trdnost, vodotesnost, obstojnost idr., še preden se material uporabi v praksi [Kosse, 2022].

Po izsledkih reference [Uhlemann, 2017] pridobivanje zadostne baze podatkov za učinkovito načrtovanje proizvodnega procesa terja velik delež celotnega časovnega vložka. Tradicionalni pristopi vključujejo ročno zbiranje podatkov in izvedbo simulacij za analizo rezultatov, kar je zamudno in pogosto nezadostno za potrebe sodobnih proizvodnih sistemov, ki zahtevajo cikle optimizacije skoraj v realnem času. DT odpravlja te pomanjkljivosti z avtomatiziranim zbiranjem podatkov in takojšnjo analizo, kar omogoča hitrejšo in natančnejšo prilagoditve proizvodnih procesov.

Kljub prednostim vpeljava DT v betonarno terja občuten napor. Zahteva namreč določeno začetno finančno naložbo, obsežno tehnično strokovno znanje, skrbno integracijo v obstoječ informacijski sistem in usposabljanje osebja. Ena glavnih ovir za uvedbo DT v mikro, mala in srednje velika podjetja (MSP) je nizek nivo avtomatizacije ter pomanjkljiva standardizacija podatkov. Raziskava, ki jo je pred desetletjem izvedla nemška inženirska zveza [VDMA, 2015], je pokazala, da je takrat le desetina anketiranih podjetij imela celovito urejeno zbiranje podatkov o procesih in napravah, medtem ko je le tretjina pridobljene podatke uporabila za povratne informacije v proizvodnji. Tudi pregled novjših objav še vedno razkriva precejšen prostor za napredek gradbene industrije na tem področju in kaže na potrebo po vertikalni integraciji omogočitvenih tehnologij v celotnem podjetju, da bi se potem lahko izkoristile vse prednosti, ki jih digitalizacija omogoča. Ne glede na omenjeno lahko DT MSP ponudi številne priložnosti, zlasti povečanje preglednosti proizvodnih procesov, izboljšanje nadzora v realnem času in zmanjšanje stroškov virov. Glede na referenco [Bischoff, 2015] lahko DT prinesejo pomembne izboljšave v MSP, ne da bi pri tem zahtevali obsežne finančne naložbe, kar je poglobljenega pomena za podjetja z omejenimi viri.

Informacijsko modeliranje gradenj, tj. BIM, je še ena pomembna digitalna tehnologija, ki je tesno povezana s konceptom DT. BIM zajema ustvarjanje in upravljanje digitalnih predstavitev fizičnih in funkcionalnih značilnosti zgradb, kot je denimo betonarna, ter zagotavlja celovito platformo za načrtovanje, oblikovanje in upravljanje gradbenih ter infrastrukturnih projektov [Begić, 2024]. Integracija BIM in DT dodatno izboljšuje možnosti simulacije, napovedovanja in optimizacije delovanja zgradb tekom njihovega življenjskega cikla. Ključno vlogo pri takšni integraciji ima lastnost DT, da se ta lahko prilagaja spremembam v fizičnem okolju ter zagotavlja točne in ažurne informacije za podporo odločanju [Revolti, 2024].

Napredek raziskav na področju DT v gradbeni industriji jasno kaže, da se ta tehnologija uspešno uveljavlja kot ključno orodje za izboljšanje učinkovitosti, sledljivosti in zanesljivosti proizvodnih procesov. Medtem ko številni avtorji obravnavajo širšo rabo DT v upravljanju objektov [Nguyen, 2023], serijski

produkciji [Kosse, 2022], pametni logistiki [Begić, 2024] in zagotavljanju kibernetike varnosti [Bhamare, 2020], se vse bolj uveljavlja potreba po konkretnih implementacijah teh konceptov v dejanskem proizvodnem okolju. Raziskave kažejo na precejšnje potencialne uporabe DT za optimizacijo vzdrževanja ([Jamwal, 2022], [Chen, 2023]), zmanjšanje okoljskega vpliva in večjo prožnost v dobavnih verigah, hkrati pa opozarjajo na nujnost standardizacije podatkovnih tokov, interoperabilnosti sistemov in izobraževanja kadra za učinkovito upravljanje novih tehnologij ([Držečnik, 2025a], [Drobnyi, 2023]). Kljub številnim prednostim ostajajo nekatere tehnološke in organizacijske ovire, kot so začetni stroški, pomanjkanje podatkovne infrastrukture in kompleksnost povezovanja fizičnih naprav z digitalnim okoljem, še vedno pomemben izziv, zlasti za mala in srednje velika podjetja ([Bischoff, 2015], [Arbizzani, 2023]).

V tem okviru sledita poglavji, ki obravnavata implementacijo DT v tehnološko okolje betonarne in njegovo praktično uporabno vrednost. Tretje poglavje tako analizira, kako uvedba DT omogoča prehod s tradicionalnega vzdrževanja na zahtevo v smeri preventivnega in nato napovednega vzdrževanja, ki temelji na kontinuiranem zajemu in analizi podatkov v realnem času. DT v tem kontekstu deluje kot osrednji informacijski sistem, ki povezuje senzoriko, digitalne modele in analitične algoritme. To omogoča pravočasno zaznavanje odstopanj v delovanju opreme, identifikacijo vzročnih nepravilnosti ter optimizirano načrtovanje vzdrževalnih posegov glede na dejanske pogoje in obremenitve. Posledično se znižujejo stroški obratovanja, podaljšuje življenjska doba opreme, zmanjšuje delež nenačrtovanih zastojev ter dviguje raven zanesljivosti in varnosti delovanja.

Poleg nadzora stanja opreme omogoča DT tudi celovito optimizacijo proizvodnega procesa. Sproten zajem in analiza podatkov omogočata prepoznavanje ozkih grl, napak v recepturah in energetskih izgub. Na podlagi simulacij različnih scenarijev lahko upravljavci testirajo vzdrževalne in proizvodne strategije v virtualnem okolju, brez tveganja za prekinitev delovanja. Tako postane možno dinamično prilagajanje delovanja glede na zunanje razmere, zahteve naročil ali izredne dogodke. Dodatno DT služi tudi kot varno učno okolje za usposabljanje osebja, saj omogoča ponavljanje postopkov, odziv na simulirane napake in razvijanje operativnih kompetenc brez fizičnega tveganja.

V četrtem poglavju je predstavljen primer implementacije DT v dejansko betonarno. Gre za celovito integracijo informacijskega modela objekta, senzorike, podatkovnih tokov in nadzornega sistema v enoten digitalni sistem, ki omogoča vizualizacijo delovanja v realnem času, napovedovanje napak in optimizacijo vzdrževanja. Konkretna uvedba DT v proizvodnem okolju služi kot empirična validacija konceptov, predstavljenih v predhodnih poglavjih. Primer izpostavlja merljive izboljšave na učinkovitost delovanja, zmanjšanje izpadov, izboljšanje kakovosti betonskih mešanic ter višjo raven varnosti in okoljske skladnosti delovanja.

3 VZDRŽEVANJE BETONARNE S PODPORO DIGITALNEGA DVOJČKA

Tehnologija DT omogoča digitalno transformacijo vzdrževanja betonarn z uvedbo podatkovno podprtega in prediktiv-

nega upravljanja opreme in procesov. Vzdrževanje se pri tem transformira iz reaktivnega in časovno načrtovanega pristopa v pametno, sprotno prilagodljivo in podatkovno vodeno upravljanje, ki temelji na spremljanju stanja naprav, zaznavanju nepravilnosti ter napovedovanju okvar. Digitalna transformacija sicer ne temelji izključno na tehnologiji DT, vendar ta predstavlja ključno komponento v širšem okviru Industrije 4.0. V kombinaciji z drugimi naprednimi tehnologijami, kot so senzorika, IoT, AI, oblačne platforme in analitika velikih podatkov, omogoča natančno simulacijo obratovalnih pogojev, optimizacijo vzdrževalnih ciklov ter sprejemanje odločitev na podlagi aktualnih podatkov. Splošno znana resnica je, da so primerno vzdrževane betonarne poglobljene pomena za proizvodnjo visokokakovostnega betona, njihovo učinkovito delovanje pa je bistveno za zagotavljanje skladnosti s standardi kakovosti na eni strani in obvladovanje obratovalnih stroškov na drugi strani. Za uspešno izvedbo takšnega vzdrževanja je treba izdelati DT za vsako ključno komponento v betonarni, od mešalcev, silosov in črpalk do transportnih in dozirnih sistemov, kar vključuje podrobne digitalne modele, povezane s senzorji ter napravami, ki zbirajo podatke o delovanju in stanju opreme. Ti senzorji spremljajo vrsto parametrov, kot so vibracije, tlak, temperatura in pretok, kar omogoča celovito sliko delovanja vsakega posameznega podsistema.

Za uspešno implementacijo DT je ključno, da so digitalni modeli dovolj podrobni, točni in informacijsko bogati, da zanesljivo predstavljajo dejansko stanje objektov in procesov. V tem kontekstu visoka natančnost pomeni ustrezen Level of Development (LOD), kar vključuje tako geometrijsko kot semantično natančnost. Na primer, modeli z LOD 300 ali višjim vključujejo točne dimenzije in tehnične značilnosti elementov, medtem ko LOD 400 in 500 omogočata podrobno proizvodno in obratovalno spremljanje ter upravljanje na podlagi podatkov iz realnega okolja. Poleg tega je treba zagotoviti zanesljiv prenos ter integracijo podatkov iz fizičnega v digitalno okolje, da DT odraža dejansko stanje v realnem času. DT tako omogoča ne le vizualizacijo, temveč tudi izvajanje napredne analitike, kar podpira informirano odločanje na ravni posameznih komponent in celotnega sistema.

Posebno pozornost je treba nameniti ločevanju dveh osnovnih ravni upravljanja, in sicer vzdrževanje betonarne in vzdrževanje tehnoloških procesov, ki se izvajajo v betonarni.

Vzdrževanje fizičnih komponent vključuje stalno spremljanje delovanja mehanskih, hidravličnih in električnih sistemov z namenom zagotavljanja njihove zanesljivosti in optimalnega delovanja. Čeprav je mogoče izvajati prediktivne (napovedne) in pogojne (kondicijsko osnovane) strategije vzdrževanja tudi brez digitalnih tehnologij, uvedba DT prinaša dodatne prednosti, saj omogoča bolj integrirano, ažurno in sistematično spremljanje stanja sistema. Senzorji, nameščeni na ključnih točkah opreme, v realnem času zbirajo podatke o temperaturi, vlagi, vibracijah, tlaku in drugih kazalnikih delovanja ter jih prenašajo v virtualni model DT. Na tej podlagi se izvaja podrobna analiza stanja sistema, ki vključuje primerjavo meritev z referenčnimi vrednostmi, prepoznavanje trendov degradacije, ocenjevanje preostale življenjske dobe komponent ter odkrivanje odstopanj, ki lahko kažejo na nastanek napake ali okvare. Tako imenovano bolj precizno napovedovanje temelji

na naprednih algoritmih AI in ML, ki združujejo zgodovinske podatke in realnočasovne meritve za oceno verjetnosti okvare v določenem časovnem obdobju.

DT odpira tudi nove možnosti, kot so simulacije različnih scenarijev, samodejno zaznavanje anomalij, vizualizacija sistema v realnem času, integracija z informacijskimi sistemi, kot sta ERP (Enterprise Resource Planning), ki omogoča celovito upravljanje poslovnih procesov podjetja, in CMMS (Computerized Maintenance Management System), ki je specializiran za načrtovanje, spremljanje in izvajanje vzdrževalnih aktivnosti, ter napredno planiranje vzdrževanja na podlagi dejanskega stanja komponent. V tem kontekstu se vzdrževanje običajno deli na tri glavne vrste: (i) preventivno vzdrževanje, ki se izvaja vnaprej na osnovi časovnih intervalov ali priporočil proizvajalca z namenom preprečevanja okvar; (ii) kondicijsko (pogojno) vzdrževanje, ki temelji na spremljanju dejanskega stanja opreme in se izvaja takrat, ko določeni parametri presežejo mejne vrednosti; ter (iii) interventno vzdrževanje, ki se izvaja kot odziv na že nastalo okvaro ali motnjo. Za preprečevanje nepredvidenih izpadov je ključno, da so vsi pomembni podatki pravilno zajeti, konsistentno vključeni v sistem DT in da so vzdrževalni postopki prilagojeni novim digitalnim možnostim. S tem se omogoči proaktiven pristop k vzdrževanju, ki zmanjšuje tveganje za nenadne okvare in povečuje zanesljivost proizvodnih sistemov ([Kritzinger, 2018], [Držičnik, 2025b]). To vključuje tudi nove možnosti, kot so avtomatizirano opozarjanje na kritična odstopanja, simulacije scenarijev okvar in optimizacija urnikov vzdrževanja glede na realne pogoje delovanja sistema.

Ugotovitve raziskovalcev [Werner, 2019] kažejo, da je ključ do uspešnega napovednega vzdrževanja v sprotnem zbiranju in analizi podatkov, ki nudijo možnost bolj natančne ocene življenjske dobe sredstev. DT omogoča identifikacijo vzorcev delovanja, zaznavo odstopanj in samodejno generiranje vzdrževalnih nalog. Nadaljnje raziskave [Arbizzani, (2023)] poudarjajo dodatno vrednost DT kot orodja za trajnostno delovanje in energetsko optimizacijo, saj se odločitve o vzdrževanju izvajajo na podlagi realnega stanja, kar zmanjšuje nepotrebne posege. Poleg tega DT podpira razvoj prilagodljivih strategij, pri katerih se življenjski cikel posameznih komponent spremlja in vrednoti skozi čas, kar omogoča optimizirano časovno planiranje zamenjav ali obnove. Tak pristop znatno povečuje zanesljivost proizvodnje v gradbeni industriji [Wang, 2022]. Kondicijsko vzdrževanje na osnovi dejanskega stanja komponent se že danes uveljavlja kot temelj digitaliziranih in trajnostnih strategij industrijskega upravljanja

Napredna analitična orodja AI in ML je sicer možno uporabiti za optimizacijo vzdrževalnih procesov tudi brez DT, vendar pa njegova uporaba omogoča pomembne nadgradnje, dodatno integracijo in celovitejši pristop k optimizaciji procesov. Z analizo preteklih podatkov o zmogljivosti opreme je mogoče razviti modele za napovedovanje življenjske dobe komponent in načrtovanje vzdrževalnih posegov. Takšna analitika lahko dodatno prispeva k zmanjšanju nepotrebnih vzdrževalnih posegov in uporabe virov. Ti modeli simulirajo scenarije in omogočajo eksperimentiranje z različnimi strategijami vzdrževanja, kar vzdrževalnim timom omogoča izbiro najbolj učinkovitih pristopov za posamezen obrat. S takšnim pristopom možno tudi zmanjšati nepotrebne prekinitve v proizvodnji in optimizirati rabo virov [Uhlemann, 2017].

Omenjeni način vzdrževanja v betonarnah pomembno vpliva tudi na njihovo varnost delovanja. Z nenehnim spremljanjem stanja takšnih obratov v realnem času lahko DT pravočasno prepoznajo potencialna tveganja, kot so nenavadna nihanja v delovanju ali znaki preobremenjenosti ter omogočijo pravočasne intervencije, kar zmanjšuje tveganje za nesreče in okvare. Poleg tega DT betonarn omogočajo analizo vzrokov okvar in razvoj ukrepov za preprečevanje podobnih težav v prihodnosti, s čimer ustvarjajo varnejše delovno okolje za zaposlene in zmanjšujejo tveganje za poškodbe opreme in infrastrukture [Držičnik, 2025a]. Z izvajanjem stalnega nadzora in optimizacijo delovanja opreme v betonarni DT prav tako prispeva k zmanjšanju porabe energije, kar pozitivno vpliva na stroškovno učinkovitost ter trajnostno poslovanje podjetja. Učinkovitejša delovanje opreme, ki je sistematično vzdrževana, povzroča manjše emisije in omogoča boljši izkoristek surovin, kar je pomembno za okoljsko ozaveščeno poslovno prakso. Ta napredna kontrola procesov prispeva tudi k boljši kakovosti betonskih izdelkov, saj DT omogočajo natančno regulacijo parametrov, kot so razmerja sestavin in časi strjevanja, kar vodi k večji zanesljivosti končnega izdelka.

Kljub številnim prednostim pa uvedba DT v betonarno s seboj prinaša tudi nekatere izzive. Razen vlaganj v fizično opremo in digitalno tehnologijo je prav tako nujno potrebno usposobiti osebe za kompetentno delo v posodobljenem delovnem okolju, kar zahteva tako tehnične kot operativne kompetence. Za izkoriščanje vseh prednosti napredne tehnologije je ključnega pomena, da se DT redno posodablja in vzdržuje, s čimer se zagotavlja natančnost in učinkovitost sistema skozi čas. Pričakuje se, da bo širša uvedba DT v betonarne v prihodnosti postala nuja, saj bodo konkurenca ter višje operativne zahteve dodatno spodbujale podjetja k digitalizaciji. Vsekakor bo napredek v senzorski tehnologiji, podatkovni analitiki in AI omogočil razvoj še zanesljivejših DT, kar bo dodatno izboljševalo učinkovitost vzdrževanja in splošno delovanje betonarn, opremljenih s to tehnologijo.

4 PRIMER UVEDBE DIGITALNEGA DVOJČKA V BETONARNO

4.1 Osnovne tehnične lastnosti betonarne

Betonarna Nagonje 2.0 (slika 1), je proizvodni obrat podjetja GIC GRADNJE, d. o. o., s sedežem v Rogaški Slatini, specializirana za izdelavo zahtevnih betonskih kompozitov. Tehnološka infrastruktura vključuje mešalec za beton, avtomatizirane transportne trakove, tehtnice, komandno sobo z nadzornim sistemom za spremljanje in zbiranje podatkov SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), priročni laboratorij, napravo za reciklažo svežega betona, večkomorni zalogovnik agregatov, silose za cement ter črpalke za doziranje aditivov. Celoten mešalni sistem je umeščen na nosilni jekleni konstrukciji, proizvodnja pa poteka skladno s standardi SIST EN 206 in SIST 1026.

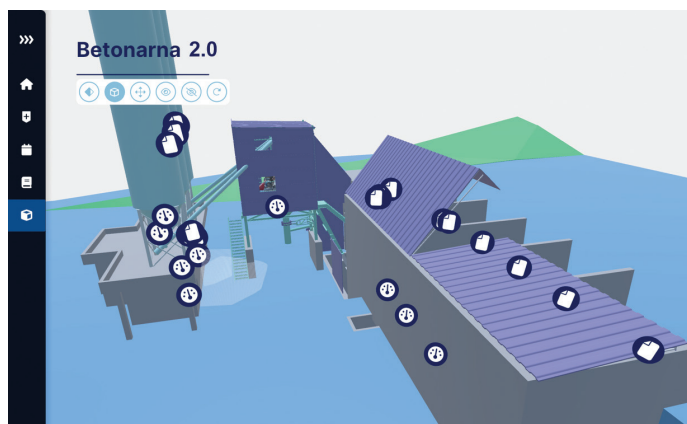
Betonarna Nagonje 2.0 predstavlja referenčni primer integracije digitalnih tehnologij in visoke stopnje avtomatizacije v proizvodnji betona, kar jo uvršča med pametne proizvodne obrate skladno z načeli Industrije 4.0. Ključne tehnološke rešitve vključujejo vgradnjo IoT-senzorjev za spremljanje fizikalnih lastnosti vhodnih surovin (npr. vlaga v agregatih), digitalno



Slika 1. Betonarna Negonje 2.0.

nadzorovano doziranje preko celovitega informacijskega sistema ERP (Enterprise Resource Planning) betonarne, uporabo sistema SCADA za centraliziran nadzor tehnoloških parametrov, merilnike porabe energije za posamezne naprave ter digitalno vremensko postajo za spremljanje okoljskih pogojev. Napredni merilni in dozirni sistemi omogočajo natančno tehtanje, sprotno sledljivost materialnih tokov in nadzor nad celotnim proizvodnim procesom in se beležijo v ERP betonarne.

Za projektiranje in izvedbo obrata je bil izdelan tridimenzionalni informacijski model (BIM), ki vključuje geometrijske značilnosti konstrukcije, razporeditev tehnološke opreme, notranjo logistiko in skladiščne cone. Čeprav je bil model prvotno namenjen načrtovanju gradnje, danes predstavlja temelj digitalnega dvojčka betonarne. BIM omogoča povezavo med geometrijskimi elementi in realnočasovnimi operativnimi podatki, kar vzpostavlja osnovo za digitalno spremljanje, simulacijo in upravljanje proizvodnje.



Slika 2. Predpripravljen BIM-model objekta za digitalni dvojček betonarne Negonje 2.0.

Digitalni dvojček betonarne predstavlja integriran informacijski sistem, ki v realnem času preslika fizično delovanje obrata v digitalno okolje. Združuje več funkcionalnih ravni: fizično raven (IoT-senzorji, merilniki, vremenska postaja), podatkovno raven (zbiranje in sinhronizacija podatkov), analitično komponento (napovedni model, podprt z umetno inteligenco) ter vizualiza-

cijski uporabniški vmesnik (BIM-model, nadzorna plošča). Ta arhitektura omogoča sprotno spremljanje obratovalnih pogojev, zaznavanje odstopanj in podporo pri odločanju.

Senzorji beležijo vse ključne parametre v vseh fazah proizvodnje – od priprave surovin do doziranja in mešanja – ter jih v realnem času prenašajo v centralno enoto digitalnega dvojčka. Sistem omogoča zaznavanje odstopanj, sprotno opozarjanje operaterjev ter beleženje stanj za nadaljnjo analizo. Napovedni model, podprt z metodami AI, temelji na zgodovinskih in trenutnih podatkih ter omogoča predvidevanje fizikalnih lastnosti mešanic (npr. konsistence, trdnosti) že pred izvedbo dejanskega mešanja. Na tej osnovi sistem predlaga korekcije časa mešanja ali razmerij sestavin, kar povečuje homogenost in zanesljivost proizvodnje.

Poleg napovedne analitike digitalni dvojček omogoča spremljanje ravni zalog, natančnost doziranja cementa in agregatov ter zmanjševanje materialnih izgub. Samodejno generira laboratorijska poročila, omogoča vpogled v parametre svežega in strjenega betona ter analizo proizvodnih ciklov v različnih časovnih okvirih. Te funkcionalnosti omogočajo dolgoročno spremljanje učinkovitosti in postopno optimizacijo proizvodnje na podlagi prepoznanih trendov.

Ob tem je pomembno poudariti, da digitalni dvojček ne predstavlja same digitalne transformacije vzdrževanja, temveč deluje kot orodje, ki to transformacijo omogoča in podpira. S tem, ko konsolidira podatke iz različnih virov – vključno s senzoriko, IoT, SCADA- in ERP-sistemi – v konsistentni, ažurni in dostopni obliki, uporabnikom omogoča celovit pregled nad delovanjem posameznih komponent ter sistema kot celote. Njegova ključna vrednost ni zgolj v vizualizaciji, temveč predvsem v tem, da omogoča strukturirano izvajanje vzdrževalnih protokolov, zaznavanje odklonov, prepoznavanje vzorcev okvar in celo simulacijo scenarijev obratovanja. V določenih primerih omogoča tudi avtomatizirano odločanje, s čimer postane digitalni dvojček aktivno upravljavsko okolje. To okolje podpira prehod od reaktivnega k preventivnemu in napovednemu vzdrževanju, hkrati pa omogoča vključevanje napredne analitike in spremembe organizacijskih postopkov znotraj širšega konteksta digitalne preobrazbe [Zupančič Hartner, 2024].

4.2 Prednosti uvedbe digitalnega dvojčka v betonarno

Betonarna Negonje 2.0 že deluje kot pametna tovarna, usklajena z osnovnimi načeli Industrije 4.0, kot so kibernetsko-fizični sistemi, povezljivost, decentralizirano odločanje, podatkovna transparentnost in sprotna prilagodljivost procesov. Ključni del digitalne preobrazbe obrata predstavlja uvedba DT, ki združuje napredno senzoriko, IoT in zmogljivosti za obdelavo podatkov v realnem času. Osnovni elementi digitalnega modela vključujejo virtualne predstavitve tehnoloških sklopov betonarne (npr. mešalnik, transportni trakovi, zalogovniki, dozirne enote), z njimi povezane procesne parametre (npr. temperatura, vlažnost, pretok, hitrost mešanja, poraba energije) ter algoritme za analizo in napovedovanje. Model se sproti ažurira prek senzorjev, ki so nameščeni na ključnih komponentah opreme in kontinuirano zbirajo podatke o delovanju naprave. Ti podatki se samodejno prenašajo v digitalni model, kjer se primerjajo z referenčnimi vrednostmi in preteklo zgodovino, kar omogoča odkrivanje odstopanj, optimizacijo delovanja in napovedovanje vzdrževalnih potreb.

DT betonarne tako omogoča dinamične simulacije in analize v realnem času, kar prinaša več pomembnih prednosti, kot so:

- operativna vidljivost – analitika v realnem času zagotavlja celovit pregled nad delovanjem obrata, kar omogoča spremljanje njegovega delovanja in učinkovito sprejemanje odločitev na podlagi informacij,
- napovedno vzdrževanje – z analizo vzorcev podatkov se lahko napovejo morebitne okvare opreme, kar ponuja možnost za proaktivno vzdrževanje in skrajšanje trajanja izpadov obrata,
- optimizacija procesov – možnost izvedbe simulacij različnih scenarijev delovanja pomaga optimizirati proizvodne procese, zmanjšati količino odpadkov in na splošno izboljšati učinkovitost obrata,
- avtomatizirano spremljanje in dokumentiranje delovanja betonarne, kar omogoča vzpostavitev rednih operativnih protokolov,
- usposabljanje osebja – možnost vadbe upravljanja v virtualnem okolju brez tveganja, preden se začne delo z dejansko opremo obrata.

4.3 Vzdrževanje v betonarni z digitalnim dvojčkom

Tehnologija DT bistveno izboljša postopke vzdrževanja v betonarni. Redna vzdrževalna opravila, kot so preverjanje nivoja olja v menjalniku mešalnika, pregledovanje stanja mešalnih lopatic in zagotavljanje delovanja hidravličnega izpustnega ventila, so načrtovana na podlagi analize podatkov v realnem času. S takšnim pristopom se ne le podaljšuje življenjska doba opreme betonarne, ampak se tudi zagotavlja dosledna kakovost proizvodnje, ki se v njej odvija. Operater mora, na primer, pred začetkom dela preveriti praznost tehtalnih posod, zaprtost in tesnjenje izstopnih ventilov, puščanje olja reduktorja mešalca, in nepoškodovanost lopatic mešalca ter preveriti morebitno puščanje olja ali težave s hidravličnim sistemom. Med proizvodnim procesom je poleg tega pomembno spremljati delovanje izpustnih vrat in pravilno smer vrtenja mešalnih gredi. Vzdrževanje visokega nivoja varnosti je ravno tako ključno področje, ki je izboljšano z uvedbo tehnologije DT v

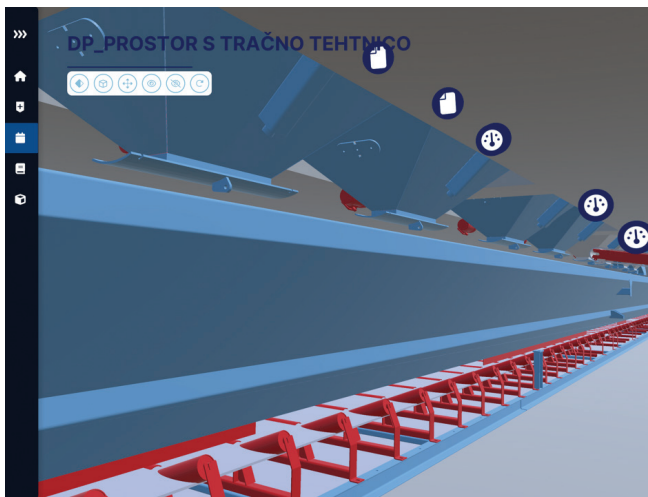
betonarno. Poseben sistem DT vključuje protokole za varno delovanje betonarne, kot je denimo zagotavljanje, da so vse varnostne naprave nameščene in pravilno delujejo, preden se proizvodni proces začne.

DT tako pomeni nepogrešljivo tehnologijo za povečanje učinkovitosti, zanesljivosti in varnosti funkcioniranja betonarne, ki hkrati dopušča prilagoditev proizvodnih procesov. Proaktivno vzdrževanje, optimizacija procesov in nadzor v realnem času prispevajo k zmanjšanju obratovalnih stroškov, višji kakovosti betonskih mešanic in tudi manjšemu vplivu betonarne na okolje. Na primer, v okviru pametne betonarne podjetja GIC Gradnje se DT uporablja za optimizacijo procesa mešanja betona, kjer sistem samodejno prilagodi razmerja komponent (voda, cement, agregat) glede na trenutno vlažnost agregata in temperaturo okolja, s čimer se zagotavlja konstantna kakovost mešanice in zmanjšuje možnost napak. Uvedba periodičnih operativnih protokolov omogoča sistematično spremljanje in analiziranje delovanja obrata, kar zagotavlja dolgoročno izboljševanje učinkovitosti. S tem DT ponuja možnosti, da betonarna lahko zadosti sodobnim industrijskim zahtevam in pričakovanjem trga ter sočasno podpira trajnostno in prilagodljivo poslovanje.

4.4 Premagovanje izzivov digitalnega dvojčka v betonarni

Praktične izkušnje, pridobljene v obravnavani betonarni, so pokazale, da uvedba DT v takšen obrat s seboj prinaša tudi določene izzive, kot so denimo integracija kompleksnih IT-sistemov, zagotavljanje kibernetske varnosti in vzpostavljane interoperabilnosti med različnimi programskimi aplikacijami. Za premagovanje teh težav se priporoča naslednje:

- standardizacija podatkovnih formatov – uporaba takšnih formatov podatkov, komunikacijskih protokolov in različnih API-jev omogoča brezhibno izmenjavo informacij in sistemsko integracijo; s tem se zmanjša tveganje za neskladja med podatki in izboljša učinkovitost pri vodenju procesov,
- robustno upravljanje informacij – dosledno izvajanje uveljavljenih postopkov, tehničnih priporočil in komunikacij-



Slika 3. Usposabljanje osebja za delo z digitalnim dvojčkom betonarne Negonje.

skih standardov, npr. OPC UA [OPC Foundation, 2023] in Asset Administration Shell (AAS) [Boss, 2021]), za ravnanje s podatki zagotavlja njihovo točnost, celovitost in varnost. Takšen pristop omogoča sistematično shranjevanje in organiziranje podatkov, kar olajša njihovo uporabo v realnem času ter prispeva k boljši sledljivosti in poglobljeni analizi procesov,

- usposabljanje in podpora zaposlenih – dvig kompetentnosti osebja za uporabo novih tehnologij in razumevanja pomena DT za delovanje betonarne; sistematično usposabljanje ter stalna tehnična podpora (glej sliko 3) zagotavljajo možnosti, da zaposleni lahko učinkovito uporabljajo nove tehnologije in rešujejo izzive v praksi.

Za varnost delovanja DT betonarne v spletnem okolju je integracija naprednih zaščitnih mehanizmov za preprečevanje nepooblaščenega dostopa in zlorabe podatkov ter kibernet-skih napadov izjemnega pomena. Z namenom preprečevanja nepooblaščenega dostopa in zmanjšanja tveganja kibernet-skih napadov [Boštjančič Pulko, 2025] je nujno razviti močne varnostne protokole, ki vključujejo:

- šifriranje podatkov – s tem se zagotavlja, da so podatki, ki se prenašajo ali shranjujejo, zaščiteni pred morebitnimi zlorabami,
- večfaktorska avtentikacija – ta omogoča dodatno plast varnosti in zmanjšuje tveganje za nepooblaščen dostop,
- nenehno spremljanje sistema – revizije in posodobitve varnostnih protokolov omogočajo hitro prepoznavanje ranljivosti, odzive na morebitne varnostne grožnje in s tem zmanjšajo tveganje za motnje v delovanju betonarne,
- izvajanje rednih analiz tveganj – sistematično ocenjevanje in upravljanje tveganj omogoča pravočasno identifikacijo in preprečevanje potencialnih groženj informacijske varnosti,
- pripravo načrtov za krizno upravljanje in zagotavljanje neprekinjenega poslovanja – jasni postopki za ukrepanje ob incidentih pomagajo zmanjšati vpliv morebitnih motenj na delovne procese betonarne,
- ozaveščanje in usposabljanje zaposlenih – redno izobraževanje zaposlenih glede kibernet-ske varnosti je ključnega pomena za preprečevanje napadov, ki izkoriščajo človeški dejavnik,
- redno izvajanje varnostnih kopij podatkov – omogoča hitro obnovo informacijskih sistemov v primeru izgube podatkov zaradi napadov ali tehničnih okvar.

Uvajanje teh varnostnih ukrepov pripomore k stabilnemu in varnemu delovanju DT v betonarni, obenem pa povečuje zaupanje zaposlenih in investorjev v zanesljivost in varnost novih tehnologij.

4.5 Ekonomske in okoljske koristi digitalnega dvojčka v betonarni

Projekt pametne tovarne Betonarna Nagonje 2.0 je obsegal načrtovanje in izgradnjo trajnostnega proizvodnega objekta po smernicah trajnostne gradnje z vključitvijo digitalne infrastrukture, reciklirnega sistema in okolju prijazno umestitvijo in ureditvijo. Osnovni namen realizacije projekta je bil povečati zmogljivosti proizvodnje betona, zmanjšati porabo naravnih virov, zagotoviti krožnostni materialni tok ter vzpostaviti ener-

getsko učinkovito, okolju prijazno delovanje betonarne. Projekt sledi načelom Industrije 4.0 z uvajanjem digitalnih tehnologij, avtomatizacije in podatkovno podprtega vodenja procesov, hkrati pa odraža vrednote Industrije 5.0 z osredotočenostjo na človeka – varnost, usposobljenost zaposlenih ter vključujoč, trajnostni pristop k razvoju obrata.

Ekonomske koristi uvedbe DT v betonarno se kažejo v nadzoru nad procesi, v znižanju obratovalnih stroškov, optimizirani porabi naravnih virov in minimalnem trajanju izpadov vsled izboljšane obvladovanja proizvodnih procesov ter sistematičnega napovednega vzdrževanja. Uvedbo DT v betonarni je smiselno podpreti z analizo pred implementacijo in po njej, vendar že obstoječa študija (Weerapura, 2023) dokazuje njegovo učinkovitost z validacijo simuliranih podatkov in strokovnimi intervjuji iz realnih RMC-obratov. Dokazane koristi vključujejo zmanjšanje proizvodnih izpadov, boljše vzdrževanje opreme, višjo produktivnost ter večje zadovoljstvo strank. Vendar pa bi za kvantitativno potrditev učinkov v konkretnem podjetju bila potrebna dodatna empirična analiza z realnimi podatki pred uvedbo in po njej. Okoljske koristi vključujejo izboljšano energijsko učinkovitost in zmanjšane emisije CO₂, kar je v skladu z globalnimi prizadevanji za zmanjšanje ogljičnega odtisa in trajnostni razvoj. V betonarni se s podporo tehnologije DT poleg običajnih projektiranih oziroma predpisanih betonov proizvajajo tudi nizkoogljični betoni. Na ta način betonarna Nagonje 2.0 ne le dosega višje standarde trajnostne gradnje, ampak postavlja nove temelje za ekonomsko in okolju prijaznejšo proizvodnjo betona, ki lahko sledi zahtevam trajnostnega razvoja in trajnostne gradnje.

5 SKLEP

Pričujoči članek je predstavil najnovejše stanje tehnike na področju naprednega upravljanja betonarn s podporo DT. Pri tem se je osredotočil na povezovanje senzorskih podatkov, spremljanje procesov v realnem času, predvidljivega vzdrževanja, simulacij delovanja in usposabljanja v kontekstu razvoja Industrije 4.0. Podan je bil reprezentativen primer dejanske srednje velike betonarne, podprte z DT, kjer je bil prikazan napredek pri upravljanju takega proizvodnega obrata. Že pri obravnavi področja upravljanja betonarn se je pokazalo, da tehnologija DT prinaša številne koristi in izzive gradbenemu sektorju, ki pregovorno izkazuje nižjo produktivnost in višje stroške proizvodnje v primerjavi z večino drugih področij industrije. Koristi uporabe DT lahko v številnih primerih pomembno presegajo izzive njihove implementacije, kar je razvidno tudi iz predstavljenega primera. Vendar je treba poudariti, da je vsaka uvedba DT specifična in je njen uspeh, vključno z donosnostjo naložbe, močno odvisen od različnih dejavnikov, kot so velikost podjetja, raven obstoječe digitalne infrastrukture, začetni vložki ter stopnja pripravljenosti za organizacijske spremembe.

Virtualno modeliranje in simulacije s podporo DT omogočajo preizkušanje različnih scenarijev v varnem, nadzorovanem okolju, s čimer se precej izboljšajo osnove za kakovostno odločanje in zmanjšajo možnosti za napake pri dejanskih situacijah. DT izboljšujejo preglednost delovanja in predvidljivost vzdrževanja fizičnih obratov, sistemov ali procesov ter povečajo njihovo operativno učinkovitost, kar posledično vodi do znižanja stroškov in doseganja višjih nivojev kakovosti poslovanja. Poleg ekonomskih, tehničnih in operativnih koristi, ki so v

fokusu podjetij, DT omogočajo tudi boljše varovanje okolja. To je še posebno pomembno z vidika svetovnih prizadevanj za zmanjšanje emisij toplogrednih plinov in spodbujanja trajnostnega razvoja.

Uvedba DT zahteva določeno spremembo v načinu razmišljanja in dela, kar v tradicionalno usmerjeni panogi, kot je gradbeništvo, lahko naleti na odpor. Zato je za uspešno vpeljevanje sodobnih tehnologij v prakso ključno postopno razvijati digitalne kompetence v podjetju, sistematično usposabljanje zaposlene in prilagajati delovne procese v sodelovanju z njimi. Za podjetja v gradbeni panogi je bistveno, da se prilagajajo spremembam vseobsegajoče digitalizacije, da ohranjajo svojo konkurenčnost v hitro razvijajočem se industrijskem okolju. Vsekakor pa nadaljnji razvoj in širša uporaba DT v gradbeništvu terjata tesno sodelovanje med raziskovalci, strokovnjaki iz industrije in regulatorji. Za celovito izkoriščanje velikega potenciala te inovativne digitalne tehnologije so ključne nadaljnje raziskave in razvoj na področju standardizacije podatkovnih formatov, protokolov in različnih API-jev ter vzpostavitev jasnih pravnih in etičnih smernic.

Na podlagi izvedene analize znanstvenih virov in predstavljenega primera uvedbe tehnologije DT v betonarni Nagonje je mogoče jasno opredeliti, da DT predstavljajo kvalitativni preskok v načinu upravljanja betonarn, ki presega tradicionalne vzdrževalne prakse. V nasprotju z zgodovinsko uveljavljenim pristopom, ki temelji na statičnih servisnih intervalih, tehničnih navodilih proizvajalcev in subjektivni presoji vzdrževalnega osebja, tehnologija DT omogoča prehod v podatkovno podprto, prilagodljivo in trajnostno naravnano vzdrževanje.

Osrednji prispevek članka je v oblikovanju in demonstraciji modela naprednega vzdrževanja, ki temelji na realnem času, senzoriki, historičnih trendih ter virtualni simulaciji delovanja ključnih komponent obrata. Tak model omogoča dinamično določanje servisnih posegov glede na intenzivnost rabe, temperaturne obremenitve, mehanske vibracije in druge obratovalne parametre, kar bistveno povečuje natančnost vzdrževalnega odločanja, zmanjšuje nepotrebne posege ter prispeva k ciljno usmerjeni rabi virov v duhu krožnega gospodarstva. Ob tem DT deluje kot aktivni člen v optimizaciji energetske učinkovitosti, zmanjšanju materialnih izgub ter stalnem zagotavljanju kakovosti končnega produkta.

Primer iz betonarne Nagonje dokazuje, da je z DT mogoče vzpostaviti celovito digitalno zrcaljenje vseh ključnih operacij, vključno z doziranjem, mešanjem, skladiščenjem in transportom surovin. Integracija BIM-modela, IoT-senzorjev in analitike v realnem času omogoča sprotno spremljanje in prilagajanje parametrov ter izvedbo simulacij različnih scenarijev delovanja brez vpliva na dejansko proizvodnjo. Na podlagi dobljenih rezultatov je mogoče oblikovati smernice za nadaljnjo digitalno transformacijo betonarn, ki vključujejo standardizacijo podatkovnih tokov, interoperabilnost med sistemi več obratov ter vzpostavitev kibernetično varnega okolja. Ključno vlogo pri tem bo igrala nadaljnja integracija AI za samodejno optimizacijo proizvodnih in vzdrževalnih procesov.

Predstavljeni pristop ne potrjuje zgolj tehnološke izvedljivosti, temveč nakazuje tudi smernice za sistematičen prenos DT v širšo betonsko industrijo. Na podlagi praktičnih rezultatov je mogoče oblikovati metodološki okvir za postopno digitalno

transformacijo betonarn, ki vključuje standardizacijo podatkovnih vmesnikov, usposabljanje kadra in postopno nadgradnjo obstoječe infrastrukture. Tako DT postaja ne le orodje za tehnično optimizacijo, temveč strateški element dolgoročne konkurenčnosti in trajnostnega razvoja proizvodnih sistemov v gradbeni industriji.

6 ZAHVALA

Raziskovalni program št. P2-0129 je sofinancirala Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna. Del raziskave je bil izveden v okviru projektov Betonarna Nagonje 2.0 in GRAD 4.0, sofinanciranih s strani Republike Slovenije in Evropske unije prek Mehanizma za okrevanje in odpornost – Next-GenerationEU.

7 LITERATURA

Alshammari, K., Beach, T., Rezgui, Y., Cybersecurity for Digital Twins in the Built Environment: Current Research and Future Directions, *Journal of Information Technology in Construction*, 26, <https://doi.org/10.36680/J.ITCON.2021.010>, 2021.

Arbizzani, E., Cancelli, E., Clemente, C., Cumo, F., Giofrè, F., Giovenale, A.M., Palme, M., Paris, S., Technological Imagination in the Green and Digital Transition, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-29515-7>, 2023.

Baduge, S.K., Thilakarathna, S., Perera J.S., Arashpour M., Sharafi P., Teodosio, B., Shringi A., Mendis P., Artificial Intelligence and Smart Vision for Building and Construction 4.0: Machine and Deep Learning Methods and Applications, *Automation in Construction*, 141, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440>, 2022.

Begić, H., Galić, M., Klanšek, U., Active BIM System for Optimized Multi-Project Ready-Mix-Concrete Delivery, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 31, <https://doi.org/10.1108/ECAM-11-2022-1064>, 2024.

Bhamare, D., Zolanvari, M., Erbad, A., Jain, R., Khan, K., Meskin, N., Cybersecurity for Industrial Control Systems: A survey, *Computers and Security*, 89, <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.101677>, 2020.

Bischoff, J., Taphorn, C., Wolter, D., Braun, N., Fellbaum, M., ... Scheffler, D., Erschließen der Potentiale der Anwendung von 'Industrie 4.0' im Mittelstand, Agiplan GmbH, Fraunhofer IML, ZENIT GmbH, 2015.

Boss B., Malakuti S., Lin S. W., Usländer T., Clauer E., Hoffmeister M., Stojanovic L., Digital Twin and Asset Administration Shell Concepts and Application in the Industrial Internet Industrie 4.0 Consortium & Plattform.. https://www.iiconsortium.org/pdf/Digital-Twin-and-Asset-Administration-Shell-Concepts-and-Application-Joint-Whitepaper.pdf?utm_source=chatgpt.com, dostop: 2025, 2021.

Boštjančič Pulko I., Božič G., Čaleta D., Čaleta M., Jakopin B., Jerina P., Mravljak M., Obreht M., Priročnik kibernetične varnosti, Urad Vlade Republike Slovenije za informacijsko varnost (UR-SIV), 2025.

- Broo, J., Schooling, J., The Adoption of Digital Twins: Enablers, Challenges and Benefits, Proceedings of the 58th Hawaii International Conference on System Sciences, <https://hdl.handle.net/10125/109736>, 2023.
- Chen, C., Fu, H., Zheng, Y., Tao, F., The Advance of Digital Twin for Predictive Maintenance: The Role and Function of Machine Learning, Journal of Manufacturing Systems, 71, 581-594, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.10.010>, 2023.
- Dai, C., Cheng, K., Liang, B., Zhang, X., Liu, Q., Kuang, Z., Digital Twin Modeling Method Based on IFC Standards for Building Construction Processes, Frontiers in Energy Research, 12, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1334192>, 2024.
- Drobnyi, V., Hu, Z., Fathy, Y., Brilakis, I., Construction and Maintenance of Building Geometric Digital Twins: State of the Art Review, Sensors, 23(9), <https://doi.org/10.3390/s23094382>, 2023.
- Držečnik, M., Klanšek, U., Advances and Challenges of Enhancing Operational Efficiency and Maintenance Protocols in the Construction Industry by Combining DT, AI, and Optimization, L. Carvalho, L. Reis, A. Neves de Almeida Baptista Figueiredo, & N. Russo (Eds.), Leveraging Technology for Organizational Adaptability (pp. 225-284). IGI Global Scientific Publishing, <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-6045-3.ch011>, 2025a.
- Držečnik, M., Klanšek, U., Hartner Zupančič, T., Cajzek, R., Improving Concrete Plant Operations and Maintenance with Digital Twin Technology, 33rd International Conference on Organization and Technology of Maintenance (OTO 2024), Springer, 1242, https://doi.org/10.1007/978-3-031-80597-4_13, 2025b.
- Grieves, M., Origins of the Digital Twin Concept, Florida Institute of Technology, NASA, Working Paper, https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept, 2016.
- Han, B., Habibi, M. A., Richerzhagen, B., Schindhelm, K., Zeiger, F., Lamberti, F., Schotten, H. D., Digital Twins for Industry 4.0 in the 6G Era, IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 4, 820-835, <https://doi.org/10.1109/OJVT.2023.3325382>, 2023.
- Jahangir, M., Solihin, W., Khan, N., A review of drivers and barriers of Digital Twin adoption in building project development processes, Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 29, 141-178, <https://www.itcon.org/paper/2024/8>, 2024.
- Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M., Deep Learning for Manufacturing Sustainability: Models, Applications in Industry 4.0 and Implications, International Journal of Information Management Data Insights, 2, <https://doi.org/10.1016/j.jjimei.2022.100107>, 2022.
- Javaid M., Haleem A., Suman R., Digital Twin Applications Toward Industry 4.0: A Review, Cognitive Robotics 3, 71-92, <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.003>, 2023.
- Kosse, S., Vogt, O., Wolf, M., König, M., Gerhard, D., Digital Twin Framework for Enabling Serial Construction, Frontiers in Built Environment, 8, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.864722>, 2022.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W., Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification, IFAC-PapersInLine, 51, 1016-1022, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>, 2018.
- Nguyen, T. D., Adhikari, S., The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction: A Literature Review, Sustainability, 15, <https://doi.org/10.3390/su151310462>, 2023.
- Noor-A-Rahim, M., John, J., Firyaguna, F., Sherazi, H. H. R., Kushch, S., Vijayan, A., ... Armstrong, E., Wireless Communications for Smart Manufacturing and Industrial IoT: Existing Technologies, 5G and Beyond, Sensors, 23, <https://doi.org/10.3390/s23010073>, 2023.
- Omrany, H., Al-Obaidi, K.M., Husain, A., Ghaffarianhoseini, A., Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review of Current Implementations, Enabling Technologies and Future Directions, Sustainability 2023, 15, <https://doi.org/10.3390/su151410908>, 2023.
- OPC Foundation, OPC UA – Interoperability for Industrie 4.0 and the Internet of Things (IoT), OPC Foundation, Industrial Internet Consortium, <https://opcfoundation.org/wp-content/uploads/2023/05/OPC-UA-Interoperability-For-Industrie4-and-IoT-EN.pdf>, dostop: 12.7.2025, 2023.
- Opoku, D. G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R., Digital Twin Application in the Construction Industry: A Literature Review, Journal of Building Engineering, 40, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102726>, 2021.
- Pan, Y., Zhang, L., Roles of Artificial Intelligence in Construction Engineering and Management: A Critical Review and Future Trends, Automation in Construction, 122, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>, 2021.
- Raj, N., Analysis of Fog Computing: An Integrated Internet of Things (IoT) Fog Cloud Infrastructure for Big Data Analytics and Cyber Security, International Conference on Artificial Intelligence and Smart Communication, 1215-1219, <https://doi.org/10.1109/AISC56616.2023.10085681>, 2023.
- Rathore, M. M., Shah, S. A., Shukla, D., Bentafat, E., Bakiras, S., The Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning: A Systematic Literature Review, Challenges, and Opportunities, IEEE Access, 9, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060863>, 2021.
- Revolti, A., Gualtieri, L., Pauwels, P., Dallasega, P., From Building Information Modeling to Construction Digital Twin: a Conceptual Framework, Production and Manufacturing Research, 12, <https://doi.org/10.1080/21693277.2024.2387679>, 2024.
- Sacks, R., Brilakis, I., Pikas, E., Xie, H. S., Girolami, M., Construction with Digital Twin Information Systems, Data-Centric Engineering, 1, <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>, 2020.
- SIST EN 206:2013+A1:2016, Beton, Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2016.

SIST 1026:2016, Beton – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo SIST EN 206, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2016.

Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., Nee, A. Y. C., Digital Twin in Industry: State-of-the-Art, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 15, 2405-2415, <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>, 2019.

Torzoni, M., Tezzele, M., Mariani, S., Manzoni, A., Willcox, K. E., A Digital Twin Framework for Civil Engineering Structures, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 418, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116584>, 2024.

Uhlemann, T. H. J., Lehmann, C., Steinhilper, R., The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0, In Procedia CIRP, 61, 335-340. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.152>, 2017.

Yang, C., Shen, W., Wang, X., The Internet of Things in Manufacturing: Key Issues and Potential Applications, IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine, 4, 6-15. <https://doi.org/10.1109/msmc.2017.2702391>, 2018.

van Dinter, R., Tekinerdogan, B., Catal, C., Predictive Maintenance Using Digital Twins: A Systematic Literature Review, Information and Software Technology, 151, <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107008>, 2022.

X., Liu, C., Song, X. & Cui, X., Development of an Internet-of-Things-Based Technology System for Construction Safety Hazard Prevention, Journal of Management in Engineering, 38, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0001035](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0001035), 2022.

VDMA, Industrie 4.0 Readiness, IMPULS-Stiftung für den Maschinenbau, den Anlagenbau und die Informationstechnik, 2015, <https://impuls-stiftung.de/wp-content/uploads/2022/05/Industrie-4.0-Readiness-deutsch.pdf>.

Wang, X., Liu, C., Song, X., Cui, X., Development of an Internet-of-Things-Based Technology System for Construction Safety Hazard Prevention, Journal of Management in Engineering, 38, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0001035](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0001035), 2022.

Wang, Y., Research on Computer Vision Application for Safety Management in Construction. Theoretical and Natural Science, 30, 232-242. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/30/20241124>, 2024.

Weerapura, V., Sugathadasa, R., De Silva, M. M., Nielsen, I., Thibbotuwawa, A. Feasibility of Digital Twins to Manage the Operational Risks in the Production of a Ready-Mix Concrete Plant. Buildings, 13(2), 447, 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13020447>

Werner, A., Zimmermann, N., Lentjes, J., Approach for a Holistic Predictive Maintenance Strategy by Incorporating a Digital Twin, Procedia Manufacturing, 39, 1743-1751. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.265>, 2019.

Zupančič Hartner, T., Cajzek, R., Povečanje proizvodnih zmogljivosti novih betonskih mešanic z izgradnjo nove betonarne s sodobno reciklirano napravo, GIC GRADNJE d.o.o., Končno poročilo o investiciji, s prilogami, št. pogodbe JR INVEST 303-1-12/2022/6, oktober, 2024.