

mag. Marjana Lutman, univ. dipl. inž. grad.
marjana.lutman@zag.si



Ilma Kulović, mag. inž. grad.
ilma.kulovic@zag.si



dr. Meta Kržan, univ. dipl. inž. grad.
meta.krzan@zag.si
Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva ulica 12, Ljubljana



Znanstveni članek
UDK/UDC: 699.841:624.131.55(497.4)

OCENA POTRESNE OGROŽENOSTI STAVB SODIŠČ V SLOVENIJI

SEISMIC RISK ASSESSMENT OF COURTHOUSE BUILDINGS IN SLOVENIA

Povzetek

V prispevku so predstavljeni namen in program raziskovalnega projekta Strateške podlage za zmanjšanje potresne ogroženosti stavb pravosodja v Sloveniji ter bistveni dosednji rezultati. Opisu značilnosti obravnavanih 76 stavb sodišč v Sloveniji in kratkemu povzetku uporabljenih metod sledi predstavitev rezultatov izdelanih ocen potresne ogroženosti obravnavanih stavb s komentarjem. Stavbe so raznolike glede na tip konstrukcije, število nadstropij, starost in potresno nevarnost lokacij, na katerih stojijo. Razvrstitev stavb je bila izvedena glede na dva kazalnika potresne ogroženosti. Prvi je razmerje med ocenjeno vrednostjo koeficienta potresne odpornosti SRCu-np in vrednostjo koeficienta projektne potresne obtežbe BSCd, ki upošteva zahteve standarda Evrokod 8 in Novo karto potresne nevarnosti iz leta 2021. Drugi kazalnik pa je z modelom POTROG ocenjena verjetnost, da bo stavba v primeru potresa po Karti intenzitete iz leta 2011 utrpela poškodovanost kategorij 3, 4 ali 5 (tj. najmanj kategorije 3) po Evropski potresni lestvici EMS-98. Istih pet stavb je prepoznanih kot potresno najbolj ogroženih po obeh parametrih. Vseh pet je zidanih in zgrajenih pred uveljavitvijo prvih potresnih predpisov. Dve najbolj ogroženi armiranobetonski stavbi sta na 11. in 23. mestu po prvem oziroma na 15. in 16. mestu po drugem parametru. Druga od njiju je bila zgrajena pred uvedbo prvih potresnih predpisov, prva pa po njej. V zadnjem delu prispevka so kot del predstavitve metodologije projekta na primeru stavbe konkretnega sodišča predstavljeni rezultati podrobnih potresnih analiz izbrane stavbe, to je potresnih analiz, izvedenih na podlagi podrobnega pregleda in preiskav stavbe, ki služijo za natančno oceno potresne odpornosti stavbe v obstoječem in različnih variantah utrjenega stanja.

Ključne besede: Potresna ogroženost, stavbe sodišč, model POTROG, in situ preiskave, potresna analiza, ocena stroškov utrditve.

Summary

The article presents the purpose and the program of the research project "Strategic basis for the reduction of seismic risk of courthouse buildings in Slovenia", together with main results. The description of the main characteristics of 76 courthouse buildings in Slovenia is followed by a summary of the methods used, as well as the presentation and discussion of the obtained results of the seismic risk assessments of the buildings under consideration. The buildings are diverse in terms of the structural type, the number of floors, the age and the seismic hazard of their locations. The classification of buildings was carried out using two seismic risk indicators. The first one is the ratio between the estimated value of the seismic resistance coefficient SRCu-np and the value of the design base shear coefficient BSCd, which takes into account the requirements of Eurocode 8 and the New Seismic Hazard Map from 2021. The second indicator is the probability, estimated using the POTROG model, that the building will suffer damage of grade 3, 4 or 5 (i.e. at least grade 3) according to the European Macroseismic Scale EMS-98 if hit by an earthquake according to the 2011 Intensity Map. The same five buildings are at the top of the list in terms of seismic risk according to both parameters. All five are masonry buildings and were constructed before the implementation of the first seismic codes. Two reinforced concrete buildings with the highest seismic risk are in 11th and 23rd place according to the first, or in 15th and 16th place according to the second parameter. The second of them was built before, and the first after the introduction of the first seismic regulations. The final part of the article outlines the methodological framework adopted within the project for conducting detailed seismic resistance assessments of selected reference buildings. This is exemplified by the case study of the courthouse building in Sevnica, comprising a description of the structural characteristics of the analysed building, the performed in-situ investigations and experimental tests, as well as the results of the global seismic performance evaluation in its existing condition and under various strengthening schemes.

Key words: Seismic risk, Courthouse buildings, POTROG model, In-situ investigations, Pushover analysis, Strengthening cost estimation.

1 UVOD

Visoka potresna ogroženost v Sloveniji je posledica visoke izpostavljenosti potresom in visoke potresne ranljivosti stavb in drugih gradbenih objektov. V večini delov naše države moramo namreč v povratni dobi 475 let pričakovati potrese z intenziteto VII EMS ali več. V širšem pasu, ki v smeri severozahod-jugovzhod prekriva osrednji del Slovenije, pa lahko pričakujemo najmočnejše potrese, z intenziteto VIII EMS [Šket Motnikar, 2011]. Delež potresno ranljivejših stavb, ki so bile zgrajene v obdobjih pred letom 1965, ko naj bi bili uveljavljeni prvi predpisi za projektiranje in gradnjo potresno odpornih konstrukcij, torej so bile grajene izkustveno ali z upoštevanjem zgolj navpične obtežbe, po podatkih iz Katastra nepremičnin znaša 36 % celotnega stavbnega fonda [MNVP, GURS, 2025]. Pri stavbah, zgrajenih po letu 1965, so se ob rušilnih potresih doma in v svetu postopoma uveljavljala znanja potresnoinženirske stroke, s pomočjo priporočil in zahtev prvih oziroma kasnejših in najsodobnejših predpisov.

Učinkovito in edino zanesljivo zaščito pred porušitvijo predstavlja dovolj velika potresna odpornost stavb in drugih gradbenih objektov, ki jo v fazi projektiranja in izvedbe zagotavlja upoštevanje ustreznih tehničnih predpisov. Z neustrezno odpornostjo stavb pa je povezana velika verjetnost za njihovo porušitev ali zelo veliko poškodovanost, za posledične človeške žrtve ter neposredno in posredno gospodarsko izgubo. Zato je za družbo kot celoto vitalnega pomena, da se stavbe s previsoko potresno ranljivostjo bodisi utrdijo bodisi nadomestijo z novimi. Stavb z neustrezno potresno odpornostjo je veliko, med njimi so tako stanovanjske stavbe kot stavbe vseh drugih namembnosti, dosega tega cilja pa je povezana z visokimi stroški. Zato je k reševanju te problematike treba pristopiti na državnem nivoju, strateško in postopoma, z upoštevanjem vnapij določenih prioritet.

Tako so tudi slovenski strokovnjaki za potresno inženirstvo že pred desetletji pristopili k sistematičnemu pregledovanju in poenostavljenemu ocenjevanju potresne ogroženosti večjega števila izbranih stavb. Na tedanjem Zavodu za raziskavo materiala in konstrukcij (ZRMK) so se leta 1986 pričele prve raziskave na tem področju, v ta namen so bile tudi razvite metodologije ocenjevanja, predvsem za zidane stavbe [Sheppard, 1986]. Nato je bila med drugim leta 1991 v sodelovanju tedanjih ZRMK in Seizmološkega zavoda Republike Slovenije za Mestni štab za civilno zaščito izdelana ocena potresne ogroženosti preko 113 stavb v Mestni občini Ljubljana [Tomažević, 1991]. Ocena ogroženosti je temeljila na razvrstitvi obravnavanih stavb v ranljivostne razrede po MSK 78 [Lapajne, 1984], številu stanovalcev obravnavanih stavb, ter v sklopu projekta razvitih modelih za oceno potresne nevarnosti v obliki poenostavljenih kart mikrorajonizacije in za oceno smrtnih žrtev. Do danes je bilo izvedenih več študij potresne ogroženosti različnih stavbnih fondov po različnih metodologijah. Med večjimi je bilo v sklopu projektov POTROG [Lutman, 2013b, 2016, 2018, 2020b] iz predhodnih študij zbranih in dodatno izvedenih skupno več kot 1600 individualnih ocen stavb, na podlagi katerih je bil v sodelovanju s partnerji razvit in nadgrajen model POTROG za napovedovanje posledic potresa za Upravo za zaščito in reševanje RS za

namen načrtovanja odziva. Za pripravo strategije tedanjega Ministrstva za okolje in prostor RS za zmanjšanje potresnega tveganja v Sloveniji je bila leta 2021 v sklopu nacionalnega potresnega stresnega testa [Dolšek, 2020; Babič, 2022] z uporabo metodologije, ki temelji na verjetnostni analizi potresnega tveganja in vključuje vrednotenje vplivov negotovosti, modelno ocenjenih okoli 500.000 stavb ali njihovih delov, kar predstavlja večino slovenskega stavbnega fonda. V posameznih študijah so bile za analizo potresne ogroženosti različnih skupin stavb izbranega fonda uporabljene tudi različne metode, npr. pri oceni potresne ogroženosti stavb mestnega jedra v Idriji [Gostič, 2013; Lutman, 2013a], ali pa so obravnavale arhitektonsko specifične stavbe, npr. cerkve [Bosiljkov, 2009]. Zaključki vseh študij so podobni; poudarjajo visoko potresno ranljivost starega stavbnega fonda, potrebo po sistematičnih prenovah, večinoma pa omogočajo tudi razvrstitev stavb po ogroženosti.

Po izvedbi manj zanesljivih ocen na nivoju izbranega fonda se za stavbe, ocenjene kot potresno najbolj ogrožene, prioriteto izvede podrobna analiza potresne odpornosti v obstoječem in navadno nekaj različicah utrjenega stanja, pri čemer se uporabijo metode iz veljavnih predpisov, in se na podlagi rezultatov izbere optimalna različica utrditve. Ta mora zasledovati dosego ustrezne potresne odpornosti in mehanske odpornosti na vse druge predpisane vplive. Glede na to, da je utrditev konstrukcije najobsežnejši poseg v stavbo, pa je smiselno, da se ta projektira in v primeru izvedljivosti in ekonomske upravičenosti tudi izvede v okviru celovite prenove stavbe, da se torej zanjo dosežejo tudi ustrezna požarna odpornost, energetska učinkovitost in izpolnijo druge bistvene zahteve veljavne gradbene regulative.

K sistemskemu pristopu k zmanjšanju potresne ogroženosti se je s sprejetjem Resolucije o krepitvi potresne varnosti do leta 2050, imenovane Prehitimo potres (ReKPV50) [MNVP, 2023], zavezala tudi država. Že pred tem je bilo zmanjšanje potresne ogroženosti poleg vidika porabe energije kot eden ključnih ciljev pri obnovi stavbnega fonda navedeno tudi v strateških ciljnih Dolgoročne strategije energetske prenove stavb do leta 2050 v Republiki Sloveniji [DSEPS, Dolgoročna strategija energetske prenove stavb do leta 2050, 2021], od leta 2024 pa naslavljanje problematike skozi celovito prenovo vključuje tudi prenovljena Evropska direktiva o energetske učinkovitosti stavb [EPBD 2024/1275, n.d.].

1.1 Predstavitev projekta in cilji raziskave

Oblikovalci politik, ki so hkrati upravniki mnogih državnih stavb, naj bi po eni strani ustvarjali spodbudno okolje, da bi preostali upravniki in lastniki lažje pristopali k ukrepom za zmanjšanje potresne ogroženosti, po drugi strani pa bi morali biti tudi sami zgled pri doseganju omenjenega cilja. V luči napisanega Zavod za gradbeništvo Slovenije (ZAG) v sodelovanju z Ministrstvom za pravosodje (MP) v okviru ciljno usmerjenega raziskovalnega projekta št. V2-2257 (B) z naslovom Strateške podlage za zmanjšanje potresne ogroženosti stavb pravosodja v Sloveniji pripravlja strokovne in znanstvene podlage za strategijo in nadaljnje aktivnosti za zmanjšanje potresne

ranljivosti stavb, ki so v uporabi sodnih organov in jih upravlja Ministrstvo za pravosodje. Glavne dejavnosti raziskovalnega projekta vključujejo:

- ocenjevanje potresne ogroženosti vseh stavb obravnavanega fonda, ki ga upravlja MP, z uporabo metod za individualno ocenjevanje glede na prevladujoč tip navpične konstrukcije ter razvrstitev stavb po ogroženosti,
- podrobne analize izbranih stavb v obstoječem stanju, po oceni bolj ogroženih in reprezentativnih za posamezen tip navpične konstrukcije, ki zajemajo podrobne preglede nosilne konstrukcije in preiskave vgrajenih materialov ter potisne analize potresne odpornosti,
- študije možnih različic protipotresne utrditve, ki zajemajo potisne analize izbranih stavb v utrjenem stanju, ob upoštevanju načinov utrditve, možnih za posamezen tip konstrukcije, skupaj z ocenami stroškov.

Rezultati projektnih aktivnosti bodo služili kot smernice za pripravo strokovnih podlag in projektiranje ukrepov za utrditev podrobno analiziranih stavb ter kot izhodišča za utrditev drugih stavb, omogočili bodo tudi bolj informirano finančno načrtovanje prihodnjih investicij za izboljšanje potresne odpornosti stavb pri upravljanju stavbnega fonda.

Prispevek podrobneje opisuje metodologijo in rezultate prvega dela projekta, tj. ocenjevanja potresne ogroženosti obravnavanega stavbnega fonda. Poleg tega na izbranem primeru rezultatov analiz sodišča v Sevnici [Lutman, 2022a] predstavlja metodologijo podrobne analize, ki bo aplicirana na izbrane, potresno bolj ogrožene stavbe, tj. podroben terenski pregled obstoječe nosilne konstrukcije in laboratorijske preiskave ter potisno analizo za izračun potresne odpornosti stavbe v njenem obstoječem stanju in možnih utrjenih stanjih za oceno učinkovitosti in stroškov utrditvenih ukrepov.

2 OBRAVNAVANI STAVBNI FOND – OSNOVNE ZNAČILNOSTI IN LOKACIJE

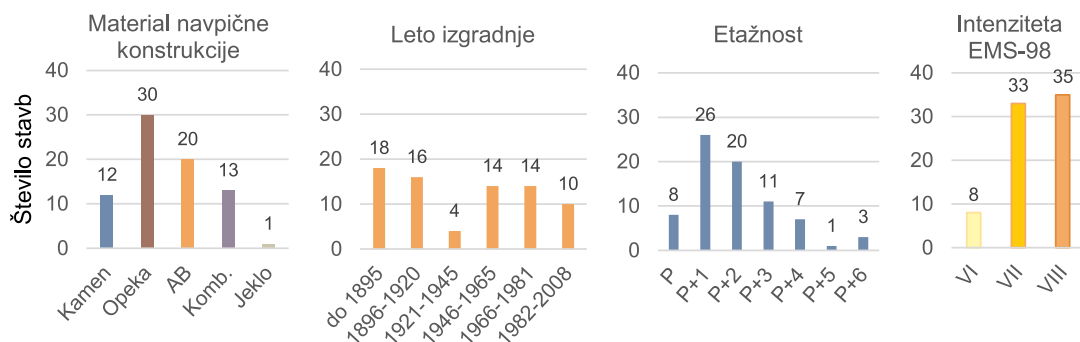
Za obravnavo je MP izbralo stavbe, ki so v celoti ali delno v uporabi sodišč ali drugih pravosodnih organov. Stavbe se razlikujejo po tipu navpične nosilne konstrukcije, številu nadstropij in starosti. Nahajajo se na 54 naslovih, pri čemer sta na 18 naslovih po dve ali več stavb s samostojno nosilno konstrukcijo, ki so

lahko tudi različno stare. Posledično je bilo v raziskavi skupno ocenjenih 76 stavb oziroma konstrukcijskih enot.

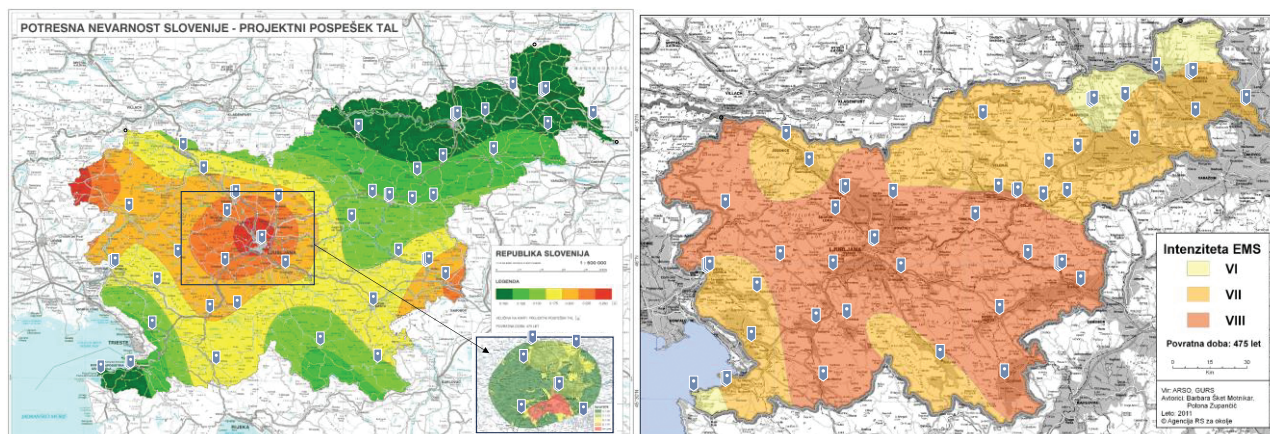
Dobra polovica stavb ima navpično nosilno konstrukcijo pretežno zidano, bodisi iz kamna (16 %) bodisi iz opeke (39 %) (slika 1). Nadalje je nosilna konstrukcija pri 26 % obravnavanih stavb armiranobetonska (AB), pri nadaljnjih 11 % stavb je navpična konstrukcija kombinacija zidov in armiranobetonskih stebrov oziroma sten, ena stavba pa ima navpično konstrukcijo jekleno. Polovica (50 %) stavb je bila zgrajena pred koncem druge svetovne vojne (SV) in sorazmerno enakomerna je zastopanost stavb iz posameznih obdobj po drugi SV (slika 1). Iz prvega povojnega obdobja, izpred uveljavitve prvih potresnih predpisov, so najstarejše AB stavbe obravnavanih sodišč, te so praviloma brez ustreznih detajlov. V tem obdobju so bile nekatere stavbe izpred prve SV nadzidane z dodatnim nadstropjem, med njimi največji sodni poslopji v Ljubljani in Mariboru. Stavbe se medsebojno razlikujejo tudi po številu nadstropij: 11 % stavb je pritličnih, največja sta deleža eno- in dvonadstropnih stavb (34 % in 26 %), preostale so višje, najvišje imajo do šest nadstropij (slika 1).

Stavbe so razmeroma enakomerno razporejene po ozemlju Slovenije. Stojijo na območjih, kjer se vrednosti projektnega pospeška tal za 475-letno povratno dobo po novi Karti potresne nevarnosti [Šket Motnikar, 2021] gibljejo med 0,10 g in 0,30 g, medtem ko se po stari karti [Lapajne, 2001] gibljejo med 0,10 g in 0,25 g (slika 2, levo). Glede na to, da se je v Sloveniji uveljavila evropska potresna lestvica EMS-98 [Grünthal, 1998] ali krajše EMS, ki med drugim definira intenziteto potresa, je bila za uporabo v sistemu zaščite in reševanja izdelana Karta intenzitet za 475-letno povratno dobo [Šket Motnikar, 2011] (slika 2, desno). Intenziteta potresa po tej karti, ki je bila v predstavljenem delu podlaga za oceno poškodovanosti stavb v primeru potresa, se na lokacijah obravnavanih stavb giblje med VI in VIII (slika 1, desno).

Poleg tega je veliko obravnavanih stavb registriranih kot nepremična stavbna dediščina v Registru kulturne dediščine Slovenije (19 stavb), medtem ko jih dodatnih 19 stoji na zaščitenem območju mestnih središč ali arheološke dediščine. Čeprav slednje ne pomeni nujno omejitev, so te informacije pomembne za načrtovanje morebitnih prihodnjih in situ pregledov in preiskav ter, še pomembneje, za oblikovanje ukrepov za utrjevanje.



Slika 1. Osnovne značilnosti obravnavanega stavbnega fonda.



Slika 2. Karti potresne nevarnosti Slovenije za 475-letno povratno dobo za projektni pospešek tal (2001) z mikrorajonizacijo Ljubljane in okolice [Lapajne, 2001] (levo) in intenziteto potresa po EMS [Šket Motnikar, 2011] (desno).

3 METODOLOGIJA OCENJEVANJA

3.1 Ocena potresne odpornosti in ranljivosti

Osnovo za oceno potresne ogroženosti posamezne stavbe predstavlja ocena njene potresne odpornosti. Pri načrtovanju investicij v okviru upravljanja večjega števila stavb, tudi ukrepov za zmanjšanje potresne ogroženosti, se potresna odpornost ocenjuje s poenostavljenimi, a za namen dovolj zanesljivimi metodami za individualno ocenjevanje. V letu 2001 je bila na ZAG razvita metoda za ocenjevanje potresne odpornosti zidanih zgradb, tj. koeficienta SRC_u , imenovana PO-ZID [Lutman, 2001, 2014], ki temelji na optimalni izbiri vhodnih in izhodnih parametrov ter bazi podatkov in rezultatov do sedaj opravljenih računskih analiz. V banko podatkov je vključena večina zidanih stavb, ki so bile v predhodnih letih sistematično pregledane in računsko analizirane na ZAG. Zaradi specifičnosti armiranobetonskih konstrukcij je bila na ZAG v letu 2002 izdelana še metoda za ocenjevanje potresne odpornosti armiranobetonskih konstrukcij PO-AB [Lutman, 2002, 2013b]. Rezultati ocenjevanja potresne odpornosti po metodi PO-ZID za zidane stavbe so primerljivi z rezultati metode PO-AB za armiranobetonske (AB) konstrukcije.

Za oceno ranljivosti objektov oziroma oceno obsega pričakovanih poškodb je bila v letih 1994 do 1996 na IKPIR v sodelovanju z ZAG razvita metoda RAN-Z [Peruš, 1995]. Metodi PO-ZID in PO-AB, katerih rezultat je ocenjena vrednost reduciranega koeficienta potresne odpornosti SRC_{u-np} (s faktorjem povezanosti k_{np} [Tomažević, 1991] korigiran koeficient potresne odpornosti SRC_u), sta sicer bolj podrobni od metode RAN-Z, katere rezultat je številčna vrednost RAN-Z, a se je vrednost RAN-Z izkazala za primernejšo za nadaljnje ocenjevanje, tj. ocenjevanje potresne ogroženosti oziroma poškodovanosti. Zato se potresna ranljivost ocenjuje iz ocenjene vrednosti SRC_{u-np} in z uporabo korelacij med vrednostjo RAN-Z in vrednostjo SRC_{u-np} [Lutman, 2003]. Korelacije so bile ugotovljene na podlagi ocenjevanja 42 stavb, pri katerem sta bila za posamezno stavbo vrednosti SRC_{u-np} in RAN-Z ocenjeni neodvisno. Osnovni korelacije za zidane in AB konstrukcije sta bili kasneje dopolnjeni za primere povezanih in armiranih zidanih konstrukcij in višjih

konstrukcij, katerih vrednosti osnovnih nihajnih časov so večje od 0,5 s. Vrednosti RAN-Z tako, v nasprotju z vrednostmi SRC_{u-np} , že zajemajo vpliv deformacijske kapacitete, odvisno od tipa konstrukcije.

Potresno odpornost in ranljivost je mogoče na opisani način oceniti za stavbe, za katere je na voljo ustrezna gradbenotehnična dokumentacija, iz katere je mogoče povzeti potrebne podatke.

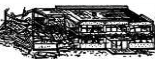
3.2 Model POTROG in ocena potresne poškodovanosti

Model POTROG [Lutman, 2013b, 2014, 2024] je bil v osnovi razvit za podporo URSZR pri načrtovanju in izvedbi odziva in reševanja po potresu. Lahko se uporablja tudi za preliminarno ocenjevanje večjega števila stavb ali za informativno ocenjevanje posameznih stavb. Model je rezultat dolgoletnega raziskovalnega in strokovnega dela na področju potresnega inženirstva na ZAG ter multidisciplinarnega sodelovanja s partnerji (ARSO, Inštitut za varstvo in Oddelek za zaščito in reševanje Mestne občine Ljubljana).

Ocena potresne ogroženosti oziroma pričakovane poškodovanosti v modelu POTROG temelji na:

- potresni ranljivosti stavbe RAN-Z, ki temelji na podrobni analizi ali individualni oceni, če sta ti narejeni, ali pa jo model oceni s sledečimi osnovnimi parametri:
 - tipom konstrukcije (materialom navpične nosilne konstrukcije),
 - obdobjem izgradnje in
 - številom nadstropij, ter
- potresni nevarnosti na lokaciji stavbe, ki jo opredeljujeta:
 - intenziteta EMS na lokaciji stavbe po karti [Šket Motnikar, 2011] in
 - tip tal (lokalne značilnosti temeljnih tal).

Ocena potresne ranljivosti v modelu POTROG temelji na korelacijah med individualno ocenjeno potresno ranljivostjo RAN-Z in tremi osnovnimi parametri o stavbi. Korelacije so bile ugotovljene na vzorcu več kot 1000 obstoječih stavb v Sloveniji, ki sestavljajo bazo ZAG. To so predvsem stavbe, individualno

D0: ni poškodb	D1: zanemarljiva do majhna	D2: zmerna	D3: znatna do velika	D4: zelo velika	D5: uničenje
	ni poškodb konstrukcije, lažje nekonstrukcijske poškodbe	lažje konstrukcijske, zmerne nekonstrukcijske poškodbe	zmerne konstrukcijske, hude nekonstrukcijske poškodbe	hude konstrukcijske, zelo hude nekonstrukcijske poškodbe	zelo hude poškodbe konstrukcije
Zidane					
Armiranobetonske					
UPORABNE		ZAČASNO NEUPORABNE		NEUPORABNE	

Slika 3. Kategorije poškodovanosti od D0 do D5 po EMS (shematični prikaz in opis za zidane in armiranobetonske stavbe) ter uporabnost stavb po potresu [Grünthal, 1998].

ocenjene v okviru dosedanjih projektov POTROG in drugih projektov, ki so jih financirali Mestna občina Ljubljana, Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport in druga ministrstva. Model je bil vzpostavljen za kamnite zidane stavbe, opečne zidane stavbe, AB stavbe, stavbe s kombinacijo nosilnih zidov in AB stebrov, jeklene stavbe in lesene stavbe. Z letom izgradnje se stavba uvrsti v eno od šestih časovnih obdobij (predstavljenih na sliki 1), ki so povezana s potresnimi predpisi, veljavnimi v času projektiranja oziroma gradnje, ali splošnimi zgodovinskimi mejniki. Prvo je obdobje pred letom 1896, ko je bil leto po ljubljanskem potresu sprejet Stavbinski red za občinsko ozemlje Deželnega stolnega mesta Ljubljane [Stavbinski red za občinsko ozemlje deželnega stolnega mesta Ljubljane, Deželni zakonik št. 28, XXI. kos, 1896], ki je, čeprav preprost, s svojimi pravili za gradnjo zidanih stavb pomembno prispeval k potresno odpornejši gradnji. Sledijo obdobji do prve SV oziroma druge SV (Obdobje 2: 1896–1920, Obdobje 3: 1921–1945) ter prvo obdobje po drugi SV. Slednje ima svoje posebnosti zaradi velikega obsega gradnje in pomanjkanja gradbenih materialov na eni strani ter odsotnosti potresnih predpisov na drugi strani (Obdobje 4: 1946–1965). Začetek novega obdobja (Obdobje 5: 1966–1981) sledi odredbi iz leta 1963 [Odredba o dimenzioniranju in izvedbi gradbenih objektov v potresnih območjih, 1963] in pravilniku iz leta 1964 [Pravilnik o začasnih tehničnih predpisih za gradnjo na seizmičnih področjih, 1964], ki sta znatno povečala potresne sile, na katere so bile projektirane konstrukcije stavb. Po močnejših potresih na Kozjanskem, v Furlaniji in Črni gori je bil leta 1981 sprejet posodobljen pravilnik [Ur. list SRFJ št. 31, 1981] (Obdobje 6: 1982–2008). Med stavbami, katerih individualne oziroma podrobne ocene potresne odpornosti predstavljajo osnovo za model POTROG, ni stavb, zgrajenih po letu 2008, ko je postala uporaba standarda Eurokod 8 [EN 1998-1:2005: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, 2005] pri projektiranju obvezna. Zato model ne omogoča ocene stavb iz tega zadnjega obdobja.

Potresna nevarnost na lokaciji posamezne stavbe na površju je opredeljena z vrednostjo s Karte intenzitete EMS [Šket Motnikar, 2011], ki velja na lokaciji stavbe, in vplivom tipa tal. Vpliv tipa tal na intenziteto potresa na površju je v modelu upoštevan kot sprememba intenzitete: -0,5 za tip tal A, +0,5 za tip tal E in +1,0 za tip tal S1, za tipe tal B, C in D se intenziteta ne spremeni.

Potresna ogroženost posamezne stavbe je v modelu POTROG izražena s poškodovanostjo, ki se na podani stavbi pričakuje ob potresu podane intenzitete. Glede na to, da lestvica EMS stavbe glede na njihovo ranljivost razvršča v ranljivostne razrede z oznakami od A do F, poškodovanost stavb pa opiše s petstopenjsko lestvico (slika 3), so bile v okviru projektov POTROG [Lutman, 2013b] za posamezne ranljivostne razrede lestvice EMS postavljene mejne vrednosti RAN-Z. Lestvica EMS namreč definira tudi intenziteto potresa, in sicer z obsegom poškodovanih stavb posameznih ranljivostnih razredov [Grünthal, 1998; Lutman, 2013b]. Poškodovanost obravnavane stavbe model POTROG izrazi z nizom šestih vrednosti: z verjetnostjo, da bo stavba pri potresu podane intenzitete nepoškodovana, z verjetnostjo, da bo utrpela poškodovanost kategorije 1 po EMS, /.../ in z verjetnostjo, da bo utrpela poškodovanost kategorije 5 po EMS [Lutman, 2013b]. Vsota navedenih šestih vrednosti je 1 oziroma 100 %.

Model POTROG je bil vzpostavljen in za zdaj velja le za območja z najvišjima dvema vrednostma projektnega pospeška tal po karti iz leta 2001 [Lapajne, 2001], tj. 0,225 g in 0,25 g oziroma za stavbe na teh območjih. Za ta območja (v nadaljevanju območja POTROG) so bile v prvem od projektov POTROG izdelane karte mikrorajonizacije (slika 2, spodnji desni kot). Omejitev veljavnosti modela izhaja iz dejstva, da stavbe iz baze ZAG, ki predstavljajo osnovo za ugotovljene zakonitosti modela, stojijo izključno na teh območjih. Omejitev uporabe modela je brezpogojna za stavbe, ki so bile projektirane po uveljavitvi prvih potresnih predpisov, in če je po karti potresne nevarnosti, veljavni v času projektiranja stavbe, potresna nevarnost na lokaciji stavbe manjša kot na območjih POTROG. Take stavbe so bile namreč projektirane na nižje potresne sile kot stavbe na območjih veljavnosti modela POTROG. Zato bi bila njihova potresna odpornost po modelu praviloma precejšnja, potresna ogroženost pa podcenjena. Če pa je na karti potresne nevarnosti iz časa projektiranja potresna nevarnost na lokaciji stavbe enaka kot na območjih POTROG, se model lahko uporablja.

Izjema pri omejitvi so lahko tudi stavbe, ki so bile projektiranje pred uveljavitvijo prvih potresnih predpisov. Ob predpostavki, da vpliv geografske lege stavbe na njeno potresno odpornost ni večji od vpliva preostalih dejavnikov, ki v modelu niso zajeti, je model za te stavbe pogojno veljaven.

3.3 Razvrščanje stavb

Za razvrščanje stavb glede na njihovo potresno ogroženost sta primerna dva parametra:

- razmerje med ocenjeno vrednostjo reduciranega koeficienta potresne odpornosti SRC_{u-np} in vrednostjo BSC_d , tj. vrednostjo koeficienta strižne obtežbe, določene na osnovi parametrov potresne obtežbe po standardu Evrokod 8 [Lutman, 2013b], in
- kumulativna verjetnost za poškodovanost kategorij 3, 4 in 5 po EMS, ki je vsota verjetnosti za poškodovanost 3, 4 in 5 (KVP), ocenjenih z modelom POTROG.

Potresno bolj ogrožene so stavbe z nižjo vrednostjo prvega in višjo vrednostjo drugega parametra.

Prvi parameter je le okvirni pokazatelj doseganja zahtevane potresne odpornosti po Evrokod 8. Pri oceni potresne odpornosti se namreč praviloma upoštevajo karakteristične in ne projektne trdnosti vgrajenih materialov, torej karakteristične trdnosti brez redukcije s faktorjem zaupanja, ki je lahko zelo različnih vrednosti, odvisno od nivoja poznavanja konstrukcije oziroma obsega detaljnega pregleda in testiranja vgrajenih materialov. Ocenjuje se torej mejni koeficient SRC_{u-np} in ne projektni koeficient SRC_d . Vrednost SRC_d bi bila nekoliko nižja od vrednosti SRC_{u-np} , doseganje projektnega koeficienta strižne obtežbe BSC_d in s tem zahtev EC8 pa tudi nekoliko nižje, kot kaže razmerje SRC_{u-np}/BSC_d .

Drugi parameter je bil kot primeren pokazatelj potresne ogroženosti prvič uporabljen v strokovnih podlagah za DSEPS [Lutman, 2020a; DSEPS, Dolgoročna strategija energetske prenove stavb do leta 2050, 2021].

4 OCENE OBRAVNAVANIH STAVB IN RAZVRSTITEV GLEDE NA POTRESNO OGROŽENOST

4.1 Tehnična dokumentacija in vizualni pregledi

V prvi fazi projekta je bilo iz razpoložljivega gradiva pokrajinskih in lokalnih arhivov, arhivov upravnih enot in arhivov sodišč ter arhiva MP izbranih ter digitaliziranih približno 4000 dokumentov oziroma načrtov (slika 4). Za vse digitalizirane dokumente je bila pregledana njihova vsebina, dokumenti z

iskano vsebino pa so bili pregledani podrobneje. Pridobljena dokumentacija je bila za 70 od skupno 76 obravnavanih stavb zadostna podlaga za individualno ocenjevanje. To pomeni, da je vsebovala načrte in izračune, iz katerih je bilo mogoče povzeti podatke o dimenzijah in sestavi konstrukcije, vrsti in mehanskih lastnostih vgrajenih gradiv, pri AB konstrukcijah tudi armaturne načrte ali ustrezne zapise v statičnem računu glede količin armature in vrste armaturnega jekla.

V drugi fazi so se z vizualnimi pregledi stavb ugotavljale skladnost dejanskega stanja s pregledano dokumentacijo in morebitne poškodbe na vidnih delih konstrukcije. Morebitna neskladja in naknadni posegi, npr. dodatni preboji za vratne odprtine, so bili pri oceni upoštevani v največji možni meri. Podatki iz pridobljene dokumentacije in vizualni pregledi so služili tudi za oceno treh osnovnih parametrov o stavbi, ki so na voljo v Katastru nepremičnin [MNVP, GURS]. S tem se sistematično ugotavlja ustreznost podatkov v Katastru nepremičnin, predlagajo popravki in s tem omogoča večja zanesljivost modelnih ocen. Te so namreč strokovna podlaga sistema POTROG za vse stavbe, za katere v sistemu ni na voljo individualnih ali podrobnih ocen potresne ogroženosti.

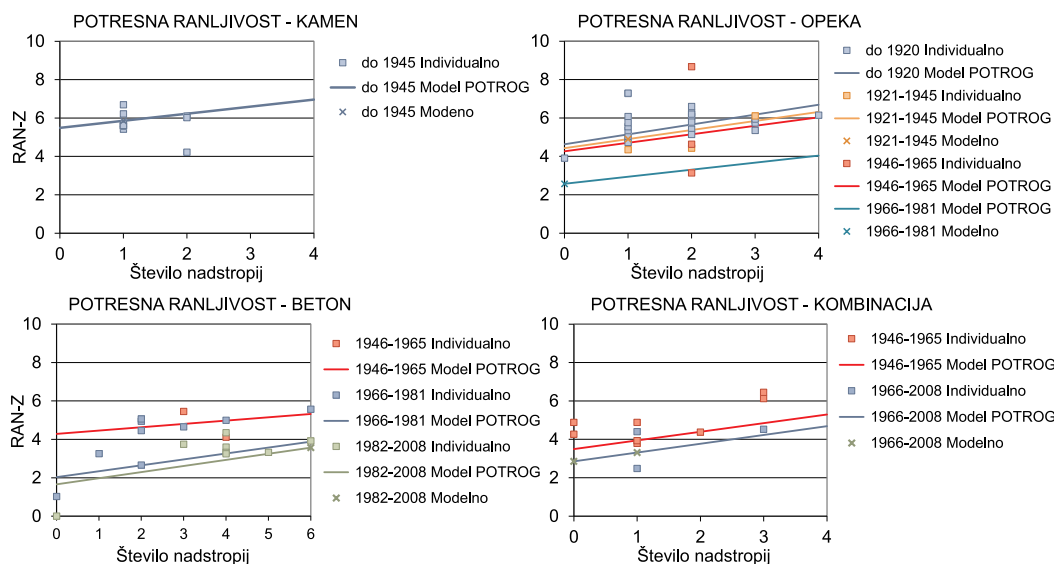
4.2 Ocene potresne ranljivosti

Ocene potresne odpornosti in potresne ranljivosti so bile izdelane oziroma pridobljene na treh nivojih natančnosti (podrobno, individualno in modelno). Za pet od 70 stavb z zadostno dokumentacijo za individualno ocenjevanje so bile podrobne potresne analize izdelane že v okviru predhodnih projektov in od tam pridobljene vrednosti reduciranega koeficienta potresne odpornosti SRC_{u-np} . V projektu je zato bilo individualno ocenjenih 65 stavb. Preostalih šest stavb je bilo ocenjenih z modelom POTROG. Pri tem so modelne ocene za tri stavbe (eno z AB konstrukcijo in dve s kombinirano konstrukcijo) zaradi omejitve modela neustrezne.

Na sliki 5 so prikazane ocenjene vrednosti RAN-Z za vse obravnavane stavbe glede na material navpične konstrukcije razdeljene v štiri diagrame. V posameznem diagramu so prikazane tudi korelacije med potresno ranljivostjo in številom nadstropij [Lutman, 2013b]. Praviloma ima vsako od šestih izbranih obdobj svoj korelacijski koeficient, v nekaterih primerih je skupna korelacija za dve ali več obdobj. Za individualno ocenjene in predhodno podrobno analizirane stavbe so vrednosti RAN-Z na sliki 5 prikazane z markerji kvadratne oblike, za modelno ocenjene stavbe pa s križci, pri čemer so križci seveda na ustrezni korelacijski premici.



Slika 4. Razpoložljiva in pregledana tehnična dokumentacija.



Slika 5. Ocene potresne ranljivosti za posamezne obravnavane stavbe, ločeno za štiri tipe nosilne konstrukcije: Kamnita zidana (zgoraj levo), Opečna zidana (zgoraj desno), Armiranobetonska (spodaj levo) in Kombinacija nosilnih zidov in AB stebrov (spodaj desno); ter primerjava s korelacijami modela POTROG za posamezna obdobja izgradnje.

Grafični prikaz individualnih ocen skupaj z modelnimi oziroma korelacijami pokaže raznolikost stavb, ki imajo isto kombinacijo treh parametrov iz REN, in tako dopolnjuje navedbe vzrokov za odstopanja posamezne stavbe v eno in drugo smer ter prikaže napake, ki jo na ravni posamezne stavbe prinaša uporaba modela POTROG.

Pri primerjavi individualnih ocen s pripadajočo korelacijo je med drugim treba upoštevati lokacijo stavbe in leto izgradnje. Ocene stavb, ki so glede na omejitve modela veljavne ali pogojno veljavne (točka 3.2), so praviloma enakomerno razvrščene nad in pod pripadajočo korelacijo. Individualno oceno take stavbe lahko primerjamo z vrednostjo na korelaciji, ki je za to stavbo modelna ocena, morebitno odstopanje individualne vrednosti RAN-Z od modelne pa je posledica razlik med značilnostmi stavbe in njene konstrukcije ter povprečnimi značilnostmi ustrezne skupine stavb v bazi ZAG.

Model POTROG je veljaven oziroma pogojno uporaben za vse obravnavane kamnite in opečne stavbe. Med kamnitimi (slika 5, zgoraj levo) izstopa stavba, katere individualna ocena $RAN-Z=4,22$ je izraziteje manjša od modelne vrednosti 6,23. To je posledica dejstva, da so bili v stavbi nosilni zidovi sistematično injektirani in zanje zato pri individualni oceni upoštevane izboljšane mehanske lastnosti. Pri opečnih stavbah (slika 5, zgoraj desno) je razlika v količini zidov v eni in drugi smeri zelo pogost vzrok za visoko potresno ranljivost. Med enonadstropnimi stavbami iz obdobja do leta 1920 je ta vzrok prisoten pri najranljivejši stavbi ($RAN-Z=7,29$). Najranljivejša med vsemi opečnimi ($RAN-Z=8,67$) je dvonadstropna stavba iz obdobja 1946-1965, ki v kritični etaži praktično nima prečnih nosilnih zidov. Po drugi strani je v isti skupini (opečna, P + 2, isto obdobje) najmanj ranljiva ustrezno zasnovana stavba, ki ima $RAN-Z=3,14$.

Pri armiranobetonskih stavbah, ki jih je skupno 20, je model POTROG veljaven za le tri stavbe, pogojno uporaben pa za dodatno eno stavbo. Za preostale stavbe model ni veljaven, saj so bile zgrajene po uvedbi prvih potresnih predpisov, stojijo na območjih nižje potresne nevarnosti, so bile temu ustrezno

projektirane in so zato pričakovano bolj ranljive kot stavbe na območjih POTROG. Potresna ogroženost po obstoječem modelu POTROG zanje ne bi bila ustrezna oziroma bi bila podcenjena. Pri AB stavbah so med vzroki za visoko potresno ranljivost nizke trdnosti betona in velike vitkosti stebrov, pogosto različne v eni in drugi smeri, zaradi česar stebri nimajo ustrezne upogibne nosilnosti.

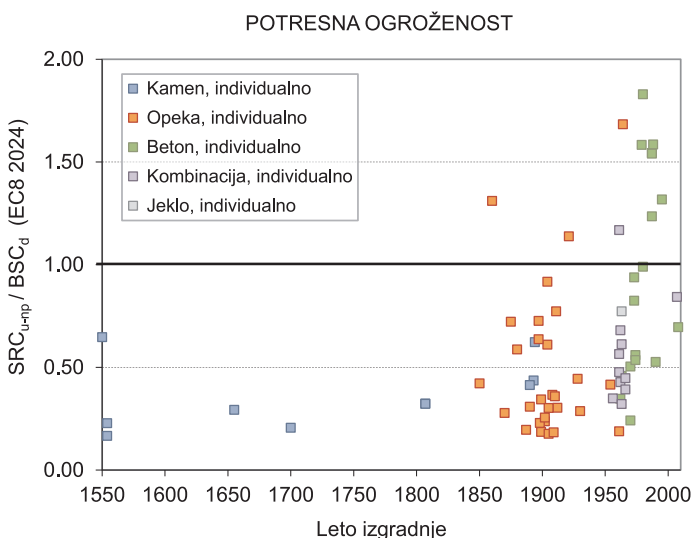
Pri stavbah s kombinirano konstrukcijo, ki jih je od obravnavanih skupno 13, je model POTROG veljaven za štiri stavbe, pogojno uporaben pa za dodatnih sedem. Kljub temu je potrebna ranljivost večine od teh enajstih stavb večja od potresne ranljivosti po modelu POTROG. Med vzroki za njihovo visoko potresno ranljivost so kasneje dodana sorazmerno velika teža v stavbi, vzroki, navedeni pri AB stavbah, in neustrezna kombinacija nosilnih zidov in AB stebrov.

4.3 Ocene potresne ogroženosti in razvrstitev

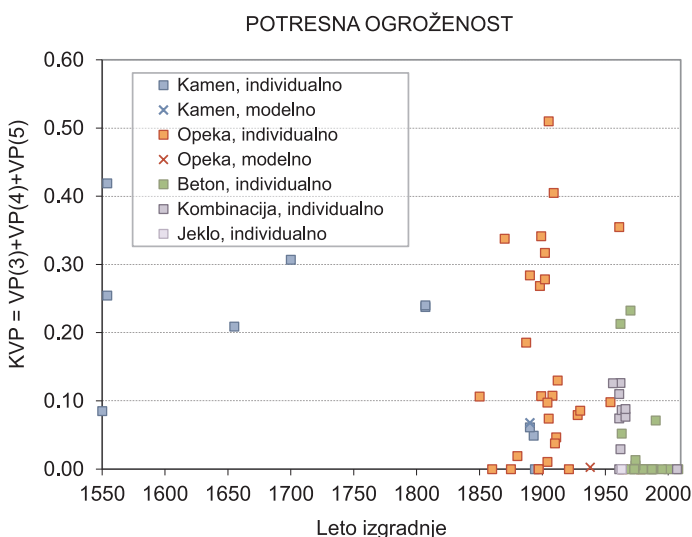
Ocena potresne ogroženosti posamezne stavbe po modelu POTROG temelji na oceni potresne ranljivosti in oceni potresne nevarnosti na lokaciji stavbe. Kot rečeno, je bila za 65 stavb upoštevana vrednost RAN-Z na podlagi individualne ocene, za pet stavb vrednost RAN-Z na podlagi predhodne podrobne analize, za tri stavbe pa modelna ocena RAN-Z. Tri stavbe so zaradi odsotnosti dokumentacije in neprimernosti uporabe modela POTROG ostale neocenjene.

Pri oceni potresne nevarnosti je bil upoštevan tip tal, ki je bil za enajst stavb ocenjen na podlagi geoloških raziskav ali geomehanskega pregleda, za nadaljnjih 13 stavb je bil tip tal povzet iz kart mikrorajonizacije, izdelanih v projektu POTROG, za preostalih 49 stavb pa je bilo za oceno poškodovanosti po modelu POTROG predpostavljeno, da so tla pod stavbo tipa B, C ali D, pri katerih je intenziteta na površju enaka intenziteti po karti (slika 2, desno), za določitev predpisane potresne obtežbe po EC8 pa je bil upoštevan tip tal C.

Na slikah 6 in 7 so prikazani rezultati, na sliki 6 izraženi z razmerjem SRC_{u-np}/BSC_d (potresna ogroženost je obratno sorazmerna z razmerjem SRC_{u-np}/BSC_d), na sliki 7 pa s kumulativno verjetnostjo poškodovanosti KVP (potresna ogroženost je sorazmerna s KVP).



Slika 6. Ocene potresne ogroženosti individualno ocenjenih stavb, izražene z razmerjem SRC_{u-np}/BSC_d , v odvisnosti od leta izgradnje.



Slika 7. Ocene potresne ogroženosti individualno in modelno ocenjenih stavb, izražene s kumulativno verjetnostjo poškodovanosti (KVP), v odvisnosti od leta izgradnje.

Po obeh razvrstitvah je potresno najbolj ogroženih istih pet stavb. Vse imajo navpično konstrukcijo zidano, ena kamnito, preostale opečno. Pri vseh je značilna sorazmerno visoka teža stavbe in sorazmerno majhna količina zidov v šibkejši tlorsni smeri. To je hkrati pet stavb, ki imajo med ocenjenimi najvišjo potresno ranljivost (slika 5). Ker pa je potresna nevarnost na lokacijah teh stavb različna, je vrstni red znotraj teh petih stavb

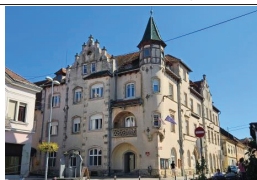
glede na potresno ogroženost (po eni in drugi razvrstitvi) drugačen kot glede na potresno ranljivost.

Najbolj ogroženi AB stavbi sta po prvem kriteriju na 11. in 23. mestu, po drugem kriteriju pa na 15. oziroma 16. mestu. Obe sta med AB stavbami tudi potresno najbolj ranljivi.

V preglednicah 1–4 so predstavljene potresno najbolj ogrožene stavbe posameznih tipov, tj. glede na vrsto materiala navpične nosilne konstrukcije (NK). V preglednicah so prikazani osnovni parametri stavbe in rezultati individualnega ocenjevanja: ocena potresne odpornosti oziroma razmerje SRC_{u-np}/BSC_d in oce-

Stavba, Potresna intenziteta EMS, Tip tal VR1-2, Vrhnika, Intenziteta: VIII, Tip tal: D	Stavba, Potresna intenziteta EMS, Tip tal TO1, Tolmin, Intenziteta: VIII, Tip tal: D																								
 Navpična NK: Kamnito zidovje Leto izgradnje: 1554 Etažnost: P + 1 $SRC_{u-np}/BSC_d = 17 \%$	 Navpična NK: Kamnito zidovje Leto izgradnje: 1700 Etažnost: P + 2 + M $SRC_{u-np}/BSC_d = 21 \%$																								
<table><tr><td>D0</td><td>D1</td><td>D2</td><td>D3</td><td>D4</td><td>D5</td></tr><tr><td>0%</td><td>24%</td><td>34%</td><td>30%</td><td>12%</td><td>0%</td></tr></table>	D0	D1	D2	D3	D4	D5	0%	24%	34%	30%	12%	0%	<table><tr><td>D0</td><td>D1</td><td>D2</td><td>D3</td><td>D4</td><td>D5</td></tr><tr><td>6%</td><td>31%</td><td>33%</td><td>24%</td><td>7%</td><td>0%</td></tr></table>	D0	D1	D2	D3	D4	D5	6%	31%	33%	24%	7%	0%
D0	D1	D2	D3	D4	D5																				
0%	24%	34%	30%	12%	0%																				
D0	D1	D2	D3	D4	D5																				
6%	31%	33%	24%	7%	0%																				

Preglednica 1. Osnovni podatki o stavbah in rezultati – razmerje SRC_{u-np}/BSC_d in niz verjetnosti za posamezne kategorije poškodovanosti po EMS (D0–D5) za dve potresno najbolj ogroženi kamniti zidani stavbi sodišč.

Stavba, Potresna intenziteta EMS, Tip tal	Stavba, Potresna intenziteta EMS, Tip tal																								
PO1, Postojna, Intenziteta: VIII, Tip tal: -	BR1, Brežice, Intenziteta: VIII, Tip tal: C																								
																									
Navpična NK: Opečno zidovje Leto izgradnje: 1905 Etažnost: K + P + 1(+ M) SRC _{u-np} /BSC _d = 18 %	Navpična NK: Opečno zidovje Leto izgradnje: 1909 Etažnost: K + P + 2 SRC _{u-np} /BSC _d = 18 %																								
<table><tr><td>D0</td><td>D1</td><td>D2</td><td>D3</td><td>D4</td><td>D5</td></tr><tr><td>0%</td><td>17%</td><td>32%</td><td>33%</td><td>15%</td><td>3%</td></tr></table>	D0	D1	D2	D3	D4	D5	0%	17%	32%	33%	15%	3%	<table><tr><td>D0</td><td>D1</td><td>D2</td><td>D3</td><td>D4</td><td>D5</td></tr><tr><td>0%</td><td>25%</td><td>34%</td><td>29%</td><td>11%</td><td>0%</td></tr></table>	D0	D1	D2	D3	D4	D5	0%	25%	34%	29%	11%	0%
D0	D1	D2	D3	D4	D5																				
0%	17%	32%	33%	15%	3%																				
D0	D1	D2	D3	D4	D5																				
0%	25%	34%	29%	11%	0%																				
SK1, Slovenske Konjice, Intenziteta: VII, Tip tal: -	NM1-2, Novo mesto, Intenziteta: VIII, Tip tal: A																								
																									
Navpična NK: Opečno zidovje Leto izgradnje: 1961 Etažnost: P + 2 SRC _{u-np} /BSC _d = 19 %	Navpična NK: Opečno zidovje Leto izgradnje: 1899 Etažnost: (K +)P + 1(+ M) SRC _{u-np} /BSC _d = 18 %																								
<table><tr><td>D0</td><td>D1</td><td>D2</td><td>D3</td><td>D4</td><td>D5</td></tr><tr><td>0%</td><td>29%</td><td>36%</td><td>26%</td><td>9%</td><td>0%</td></tr></table>	D0	D1	D2	D3	D4	D5	0%	29%	36%	26%	9%	0%	<table><tr><td>D0</td><td>D1</td><td>D2</td><td>D3</td><td>D4</td><td>D5</td></tr><tr><td>6%</td><td>25%</td><td>34%</td><td>25%</td><td>8%</td><td>1%</td></tr></table>	D0	D1	D2	D3	D4	D5	6%	25%	34%	25%	8%	1%
D0	D1	D2	D3	D4	D5																				
0%	29%	36%	26%	9%	0%																				
D0	D1	D2	D3	D4	D5																				
6%	25%	34%	25%	8%	1%																				

Preglednica 2. Osnovni podatki o stavbah in rezultati – razmerje SRC_{u-np}/BSC_d in niz verjetnosti za posamezne kategorije poškodovanosti po EMS za štiri potresno najbolj ogrožene opečne zidane stavbe sodišč.

na potresne ogroženosti oziroma pričakovane poškodovanosti po modelu POTROG: za vsako posamezno kategorijo poškodovanosti po EMS [Grünthal, 1998] (slika 3) je navedena verjetnost, da jo bo ta stavba utrpela, če bo izpostavljena potresu z intenziteto, ki se po karti potresnih intenzitet (slika 2, desno) in upoštevanim tipom tal pričakuje na lokaciji stavbe v 475-letni povratni dobi.

Stavba, Potresna intenziteta EMS, Tip tal						Stavba, Potresna intenziteta EMS, Tip tal					
LJ2, Ljubljana, Intenziteta VIII, Tip tal: C						CE1-1, Celje, Intenziteta VIII, Tip tal: -					
											
Navpična NK: AB stebri						Navpična NK: AB stebri					
Leto izgradnje: 1970						Leto izgradnje: 1962					
Etažnost: 2K + P + 5 (+ 6)						Etažnost: K + P + 2 (+ 3) + M					
SRC _{u-np} /BSC _d = 24 %						SRC _{u-np} /BSC _d = 35 %					
D0	D1	D2	D3	D4	D5	D0	D1	D2	D3	D4	D5
12%	34%	31%	19%	4%	0%	14%	34%	31%	18%	3%	0%

Preglednica 3. Osnovni podatki o stavbah in rezultati – razmerje SRC_{u-np}/BSC_d in niz verjetnosti za posamezne kategorije poškodovanosti po EMS za dve potresno najbolj ogroženi armiranobetonski (AB) stavbi sodišč.

Stavba, Potresna intenziteta EMS, Tip tal						Stavba, Potresna intenziteta EMS, Tip tal					
KK2, Krško, Intenziteta VIII, Tip tal: -						KR1-1, Nova Gorica, Intenziteta VII, Tip tal: C					
											
Navpična NK: Opečni zidovi in AB stebri						Navpična NK: AB stebri in opečni zidovi					
Leto izgradnje: 1956						Leto izgradnje: 1963					
Etažnost: (K +) P + 1 + M						Etažnost: K + P + 3					
SRC _{u-np} /BSC _d = 35 %						SRC _{u-np} /BSC _d = 32 %					
D0	D1	D2	D3	D4	D5	D0	D1	D2	D3	D4	D5
23%	37%	28%	12%	0%	0%	33%	33%	24%	9%	0%	0%

Preglednica 4. Osnovni podatki o stavbah in rezultati – razmerje SRC_{u-np}/BSC_d in niz verjetnosti za posamezne kategorije poškodovanosti po EMS za dve stavbi sodišč, ki sta med potresno najbolj ogroženimi stavbami s kombinirano konstrukcijo.

5 PRIMER PODROBNE POTRESNE ANALIZE STAVBE SODIŠČA (ZA OBSTOJEČE STANJE IN ZA RAZLIČNE NIVOJE UTRDITEV)

V nadaljevanju projekta bo osem stavb izmed vseh obravnavanih podrobno analiziranih. Med izbranimi stavbami bodo stavbe z različnimi tipi navpične nosilne konstrukcije, med njimi pa praviloma potresno najbolj ogrožene. Zanje bodo opravljene podrobni pregledi nosilne konstrukcije in preiskave vgrajenih materialov, potisne analize potresne odpornosti v obstoječem stanju, študije možnih različic protipotresne utrditve, potisne analize potresne odpornosti v utrjenem stanju ter

ocene stroškov. Vsebina podrobne obravnave je v nadaljevanju predstavljena na primeru sodišča v Sevnici.

Poslopje sodišča v Sevnici, ki verjetno izvira iz 18. stoletja in je bilo prvič dokumentirano leta 1807, sestavljata dve stavbi. V preteklosti sta bili dograjeni in prenovljeni, zlasti po požaru leta 1854. Glavna stavba ima tloris v obliki črke L, večji južni del meri približno 14,8 x 13,8 m, manjši severovzhodni del pa približno 6,6 x 7,0 m. Zadnja stavba je v tlorisu pravokotne oblike in meri približno 8,9 x 22,9 m. Jugoahodni del glavne stavbe je podkleten, nad pritličjem pa imata obe stavbi eno nadstropje in neizkoriščeno podstrešje. Višine etaž so različne; klet je visoka približno 2,6 m, pritličje v glavni stavbi 3,5 m v južnem delu in 3,3 m v severovzhodnem delu, pritličje v zadnji stavbi 2,8 m, nadstropje pa je visoko od 3,1 do 3,4 m. Glavno stavbo pokriva dve, zadnjo stavbo pa ena dvokapna streha.

5.1 Podroben in situ pregled in preiskave

Za oceno lastnosti nosilne konstrukcije in mehanskih lastnosti vanjo vgrajenih materialov je bil na obeh stavbah izveden detajlni pregled z odvzemom vzorcev gradiv, ki so bili nato laboratorijsko preiskani [Lutman, 2022b]. Program pregleda je za pritličje predstavljen na sliki 8, levo. Pregled in preiskave so bili izvedeni v skladu z evropskim standardom Evrokod 8-3 (SIST EN 1998-3:2005 Evrokod 8: Projektiranje konstrukcij za potrebno odpornost – 3. del: Ocenjevanje in prenova stavb).

Vizualni pregled stanja in poškodb (slika 8a, b, d, g, h) ter detajlni pregled z odstranitvijo ometa in oblog (slika 8c-i) sta bila izvedena, da bi določili vrsto, geometrijo in površinsko strukturo vseh elementov konstrukcije ter zaznali poškodbe. Da bi ocenili sestavo in mehanske lastnosti nosilnega zidovja po celotnem prečnem prerezu, so bila izvedena globinska sondiranja (slika 8c, e, f), pregledana je bila struktura odvzetih jeder, odvzeti vzorci malte (slika 8i) in opeke pa so bili laboratorijsko preiskani (slika 8j).

Nosilni zidovi, od katerih so nekateri kamniti, drugi mešano kamnito-opečni, tretji pa pretežno ali v celoti opečni, stojijo na kamnitih zidanih pasovnih temeljih. Debelina zidov se spreminja glede na višino in tloris, in sicer znaša 65–85 cm v kleti, 45–95 cm v pritličju in 35–55 cm v nadstropju. Stropne konstrukcije so banjasti oboki nad kletjo, različni tipi obokov ali ravni (večinoma leseni) stropovi nad pritličjem in pretežno leseni stropovi nad prvim nadstropjem.

5.2 Potisne analize stavbe (obstoječe in utrjeno stanje)

Z upoštevanjem rezultatov pregleda in preiskav ter uporabo etažnega modela so bile izvedene potisne analize [Tomažević, 2009], ločeno za glavno in zadnjo stavbo. Analizirana so bila naslednja stanja:

- Obstoječe stanje:** obstoječe stanje kamnitih in opečnih nosilnih zidov, zidovi so brez vodoravnih zidnih vezi, stropne konstrukcije so pomanjkljivo povezane z nosilnimi zidovi.
- Povezana nosilna konstrukcija:** nosilni zidovi so povezani z vodoravnimi zidnimi vezmi (ukrep), stropne konstrukcije so s sidri povezane z nosilnimi zidovi (ukrep).



Slika 8. Tloris pritličja glavne in zadnje stavbe sodišča v Sevnici z lokacijami preglednih mest (levo), pregled poškodb (a, b), pregled stropa in strehe (c, d), globinsko sondiranje v kamnitem zidovu (e, f), površinsko sondiranje (g, h), odvzeti kosi malte (i) in laboratorijski preskus vzorca malte (j).

- C. Delno utrjeni nosilni zidovi in povezana nosilna konstrukcija: kamniti nosilni zidovi so sistematično injektirani (ukrep) in vsi ukrepi v stanju B.
- D. Utrjeni vsi nosilni zidovi in povezana nosilna konstrukcija: opečni nosilni zidovi so utrjeni z armiranimi oblogami (ukrep), kamniti nosilni zidovi so utrjeni s sistematičnim injektiranjem in armiranimi oblogami (ukrep) in vsi ukrepi v stanju B.

Upoštewane mehanske lastnosti nosilnega zidovja v obstoječem stanju temeljijo na rezultatih tlačnih preskusov vzorcev iz opečnih zidakov in vzorcev malte ter na in situ in laboratorijskih preiskavah zidov, zgrajenih iz materialov podobnih kakovosti, ki so bili v preteklosti izvedeni na ZAG; za opečno oziroma kamnito/mešano zidovje so bile v analizah predpostavljene naslednje lastnosti: karakteristična tlačna trdnost 2,0 MPa oziroma 1,0 MPa, karakteristična natezna trdnost 0,09 MPa oziroma 0,10 MPa, modul elastičnosti 2000 MPa oziroma 2700 MPa, strižni modul 200 MPa ter prostorninska teža 18 kN/m³ oziroma 22 kN/m³. Za kamnito zidovje, utrjeno s sistematičnim injektiranjem, so bile predpostavljene vrednosti karakterističnih tlačne in natezne trdnosti ter elastičnega in strižnega modula enake 1,8 MPa; 0,18 MPa; 3000 MPa in 300 MPa. V analizah so bile upoštewane projektne trdnosti zidovja, tj. s faktorjem zaupanja CF = 1,2 reducirane karakteristične vrednosti. Armirane obloge se vgradijo na obeh straneh zidov,

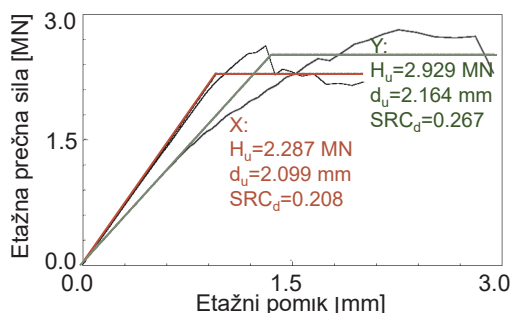
posamezna obloga je sestavljena iz armaturne mreže Q189, vgrajene v 2,5 cm debelo plast brizganega cementnega ometa, prečno skozi zid pa sta mreži na vsaki strani zidu medsebojno povezani s stremeni 6 Φ 6 mm/m².

Pri potisni analizi so bili upoštevani etažni porušni mehanizem, povezanost nosilne konstrukcije in dejanske stalne navpične obtežbe, koristne navpične obtežbe in kombinacije obtežb pa so bile predpostavljene v skladu s standardi Evrokod. Dobljene potisne krivulje so bile idealizirane, upoštevajoč pogoj enakosti energij (krivulje so za glavno stavbo, za stanje povezane konstrukcije (B) prikazane na sliki 9, levo), potresna odpornost stavbe v različnih stanjih pa je bila ovrednotena s projektnim koeficientom potresne odpornosti SRC_d, ki je bil primerjan z zahtevano potresno odpornostjo v obliki projektnega koeficienta strižne obtežbe BSC_d, ki je določen z upoštevanjem potresnih spektrov po EC8 in projektnih pospeškov na stari [Lapajne, 2001] in novi [Šket Motnikar, 2021] Karti potresne nevarnosti Slovenije (z oznakama Karta PN 2002 in Karta PN 2022 na sliki 9, desno). V preglednici na sliki 9, desno, sta poleg SRC_d in BSC_d predstavljena tudi z idealizacijo dobljeni mejni pomik d_u in z njim izračunani faktor obnašanja q . Ocena potresne odpornosti za stanje A je bila pridobljena s korekcijo rezultatov za stanje B s faktorjem povezanosti k_{np} [Tomažević, 1991].

5.3 Učinkovitost utrditvenih ukrepov in ocene stroškov

Za glavno stavbo je v vseh stanjih kritična vzdolžna (X) smer potresne obtežbe. Iz preglednice na sliki 9 je razvidna učinkovitost posameznih nivojev utrditve (v stanjih B, C oziroma D glede na obstoječe stanje A), in sicer s primerjavo vrednosti razmerja med SRC_d in BSC_d za utrjeno stanje (B, C oziroma D) z vrednostjo SRC_d/BSC_d za obstoječe stanje (A). V preglednici so predstavljeni tudi stroški, ocenjeni za ukrepe, ki so upoštevani za določeno stanje.

Medtem ko bi se potresna odpornost stavbe bistveno izboljšala že s povezovanjem konstrukcije, je potresna odpornost, ki ustreza sedanjim potresnim zahtevam, dosežena le z utrditvijo vseh nosilnih zidov v stavbi – kamnitih s sistematičnim injektiranjem in z armiranimi oblogami ter opečnih z armiranimi oblogami (stanje D).



Slika 9. Potisni in idealizirani krivulji za vzdolžno (X) in prečno (Y) smer potresne obremenitve za povezano stanje nosilne konstrukcije (varianeta B) (levo); rezultati za kritično (X) smer za štiri stanja konstrukcije (A-D), primerjave s projektno potrebno obtežbo po stari in novi karti potresne nevarnosti (Karta PN 2002 [Lapajne, 2001] in 2022 [Šket Motnikar, 2021]) ter ocene stroškov (desno).

6 ZAKLJUČKI IN PRIHODNJE DELO

Ocena potresne ogroženosti stavb izbranega fonda, izvedena v okviru raziskovalnega projekta za zmanjšanje potresne ogroženosti pravosodnih stavb v Sloveniji, bo Ministrstvu za pravosodje, ki upravlja ta stavbni fond, omogočala strokovno in znanstveno podprto sprejemanje odločitev pri načrtovanju protipotresnih utrditev pri prenovah stavb tega fonda.

Tudi pri obravnavanih stavbah se v zasnovi in detajlih konstrukcije odraža vpliv časa, v katerem so bile projektirane, zgrajene in nekatere tudi rekonstruirane. Viden je vpliv gradbene prakse in zakonodaje, ki je veljala v preteklih obdobjih, zlasti predpisov s področja protipotresnega projektiranja, ki so bili v Sloveniji na žalost uvedeni po koncu prvega obdobja po drugi svetovni vojni, iz katerega imamo relativno veliko obstoječih stavb. Tudi pri stavbah sodišč so vse prepogoste prenove s posegi, ki zmanjšujejo potresno odpornost stavb. Zaporedje prenov zidanih stavb, pri katerih so značilne »prestavitve vrat« in »umestitve inštalacij« in niti niso ustrezno dokumentirane, ima lahko nepredstavljive posledice, ki bodo razgaljene ob potresu

primerne jakosti. Na drugi strani so bile pri nekaterih stavbah prenove ustrezne, dvigalni jaški so bili npr. izvedeni s samostojno konstrukcijo, dilatirano in zunaj gabaritov obstoječe stavbe.

Vse obravnavane stavbe so bile razvrščene po individualno ocenjeni potresni ogroženosti, tako glede pričakovane poškodovanosti kot glede doseganja potresne odpornosti, predpisane s standardom Evrokod 8. Razvrstitve predstavljajo strokovno podlago za prioritete pri prenovah. Primerjava ocen z zakonitostmi modela POTROG pokaže, da ocene sledijo zakonitostim, obenem pa je bilo njihova odstopanja od zakonitosti mogoče razložiti z ugotovljenimi posebnostmi glede lastnosti konstrukcij.

V teku so podrobne obravnave osmih stavb, ki so bile med potresno najbolj ogroženimi izbrane kot referenčne. Te obravnave zajemajo podroben pregled konstrukcije, odvzem in laboratorijske preiskave vzorcev gradiv ter podrobne analize

Stanje konstrukcije	A	B	C	D	
SRC _d	0,146	0,208	0,224	0,359	
d _u [mm]	/	2,099	2,763	2,531	
q	1,5	1,788	2,127	2,015	
Karta PN 2022	BSC _d	0,450	0,377	0,317	0,335
[Šket Motnikar, 2021]	SRC _d /BSC _d	32%	55%	71%	107%
Karta PN 2002	BSC _d	0,350	0,294	0,247	0,260
[Lapajne, 2001]	SRC _d /BSC _d	42%	71%	91%	138%
Ocena stroškov [€]		98,5k	120,7k	170,4k	

potresne odpornosti. Izvedene bodo na podoben način, kot so bile izvedene pri primeru ene bolj ogroženih stavb sodišča v Sevnici in so predstavljene v prispevku. Rezultati teh obravnav bodo lahko skupaj z možnimi nabori ukrepov služili kot podlaga za pripravo projektne dokumentacije za utrditev konstrukcije posamezne stavbe ter kot reference in informacije za odgovornejše načrtovanje investicij Ministrstva za pravosodje v stavbni fond v prihodnjem obdobju.

7 ZAHVALA

Rezultati ocene potresne ogroženosti so doseženi v okviru ciljnega raziskovalnega programa (CRP) št. V2-2257 (B) z naslovom Strateške podlage za zmanjšanje potresne ogroženosti stavb pravosodja v Sloveniji, ki ga financirata Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost RS (ARIS) in Ministrstvo za pravosodje RS. Rezultati, predstavljeni kot referenčni primer konkretne pravosodne stavbe, so bili doseženi v okviru sporazuma o dodelitvi sredstev št. C2030-21-298769. Raziskave so bile izvedene tudi s podporo infrastrukturnega programa IO-0032 (A), ki ga financira ARIS.

8 LITERATURA

Babič, A., Žižmond, J., Dolšek, M., Potresno tveganje stavb-nega fonda v Sloveniji, Gradbeni Vestnik, (71), 34–47, 2022.

Bosiljkov, V., Gostič, S., Kržan, M., Antolinc, D., Žarnić, R., Izdelava in demonstracija modela za načrtovanje ohranjanja umetnostnozgodovinske dediščine v vojnih spopadih: končno poročilo za CRP MIR M4-0207. Ljubljana: UL FGG; ZRMK Institut, 2009.

Direktiva (EU) 2024/1275 Evropskega parlamenta in Sveta z dne 24. aprila 2024 o energetske učinkovitosti stavb (preno-vitev), Pridobljeno: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SL/TXT/?uri=CELEX:32024L1275>

Dolšek, M., Žižmond, J., Babič, A., Lazar Sinković, N., Jamšek, A., Gams, M., Isaković, T., Seizmični stresni test stavbnega fonda Republike Slovenije (2020-2050). Ljubljana: UL FGG, IKPIR, 2020.

DSEPS, Dolgoročna strategija energetske prenove stavb do leta 2050. Vlada RS, 2021.

EN 1998-1:2005: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, 2005.

Gostič, S., Poročilo o pripravi strokovnih podlag za strategijo zagotavljanja potresne odpornosti mesta Idrija - hitra ocena potresne ogroženosti večjega števila stavb. Ljubljana: Gradbeni inštitut ZRMK, 2013.

Grünthal, G., European macroseismic scale 1998 (EMS-98), 1998.

Lapajne, J., The MSK-78 intensity scale and seismic risk, Engineering Seismology, 20(1), 105–112, [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(84\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0013-7952(84)90047-4), 1984.

Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupanč, P., Nova karta potresne nevarnosti - projektni pospešek tal namesto intenzitete, Gradbeni Vestnik : Glasilo Zveze Društev Gradbenih Inženirjev in Tehnikov Slovenije., (50), 140–149, 2001.

Lutman, M., Ugotovitev analitičnih korelacij med rezultati starejših in nove metode za oceno potresne odpornosti ter aplikacija ugotovljene analitične korelacije na rezultatih starejših ocen. Ljubljana: Zavod za gradbeništvo Slovenije, 2003.

Lutman, M., (a), CHERPLAN: krepitev kulturne dediščine z okoljskim načrtovanjem in upravljanjem: ocena potresne ogroženosti stavb v občin Idrija: poročilo (p. 91 f.). Ljubljana: Zavod za gradbeništvo Slovenije, 2013.

Lutman, M., (a), Ocena potresne ogroženosti stavb ožje vlade in tipičnih stanovanjskih stavb v Sloveniji ter strokovna priporočila: poročilo. Ljubljana: Zavod za gradbeništvo Slovenije, 2020.

Lutman, M., (a), Pregled in preiskave nosilne konstrukcije ter analiza potresne odpornosti stavbe Okrajnega sodišča v Sevnici s smernicami za potrebne ukrepe: 2. faza. Zavod za gradbeništvo Slovenije, 2022.

Lutman, M., Model for Seismic Risk Management in Slovenia. Predstavljeno na WCEE2024, Milano, Italy, 2024.

Lutman, M., Banovec, P., Cerkl, M., (b), POTROG 4 : nadgradnja sistema za določanje potresne ogroženosti in odzivnosti za potrebe zaščite in reševanja v Sloveniji : raziskovalni projekt, zaključno poročilo. ZAG, Inštitut za vodarstvo, Pridobljeno: <https://www.gov.si/zbirke/projekti-in-programi/potrog/>, 2020.

Lutman, M., Banovec, P., Cerkl, M., Šket Motnikar, B., POTROG 3 : nadgradnja sistema za določanje potresne ogroženosti in odzivnosti za potrebe zaščite in reševanja v Sloveniji : raziskovalni projekt, zaključno poročilo. ZAG, Inštitut za vodarstvo, Pridobljeno: <https://www.gov.si/zbirke/projekti-in-programi/potrog/>, 2018.

Lutman, M., Fenjveši, P., (b), Pregled in preiskave nosilne konstrukcije ter analiza potresne odpornosti stavbe Okrajnega sodišča v Sevnici s smernicami za potrebne ukrepe : 1. faza. Zavod za gradbeništvo Slovenije, 2022.

Lutman, M., Kreslin, M., Banovec, P., Cerkl, M., POTROG 2 : nadgradnja sistema za določanje potresne ogroženosti in odzivnosti za potrebe zaščite in reševanja v Sloveniji : raziskovalni projekt, zaključno poročilo. ZAG, Inštitut za vodarstvo, Pridobljeno: <https://www.gov.si/zbirke/projekti-in-programi/potrog/>, 2016.

Lutman, M., Motnikar, B. Š., Weiss, P., Klemenc, I., Zupančič, P., Cerkl, M., ... Banovec, P., Aspects of Earthquake Risk Management in Slovenia, 4th International Conference on Building Resilience, Incorporating the 3rd Annual Conference of the ANDROID Disaster Resilience Network, 8th – 11th September 2014, Salford Quays, United Kingdom, 18, 659–666, [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00988-5](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00988-5), 2014.

Lutman, M., Peruš, I., Ocena potresne ogroženosti 12 objektov v Lek d.d. Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana, 2002.

Lutman, M., Peruš, I., Tomazevič, M., Potresna odpornost objektov v Mestni občini Ljubljana. Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana, 2001.

Lutman, M., Weiss, P., Klemenc, I., Zupančič, P., Šket Motnikar, B., Banovec, P., Cerkl, M., (b), POTROG: Potresna ogroženost v Sloveniji za potrebe Civilne zaščite. Ljubljana, Slovenia: Zavod za gradbeništvo Slovenije, Agencija Repu-

blike Slovenije za okolje, Inštitut za vodarstvo, Pridobljeno: <https://www.gov.si/zbirke/projekti-in-programi/potrog/>, 2013.

MNVP, Resolucija o krepitvi potresne varnosti do leta 2050 »PREHITIMO POTRES« (ReKPV50) (2023), Pridobljeno: <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2023-01-3592>, 2023.

MNVP, GURS, Kataster nepremičnin [Baza podatkov]. Portal prostor, Pridobljeno: <https://www.e-prostor.gov.si/podrocja/parcele-in-stavbe/kataster-nepremicnin/>, 2025.

Odredba o dimenzioniranju in izvedbi gradbenih objektov v potresnih območjih. Ur. l. SRS 18/63, 1963.

Peruš, I., Fajfar, P., Reflak, J., Potresna ogroženost in varstvo pred potresi. Poročilo št. 1: Metodologija za oceno potresne ranljivosti obstoječih gradbenih objektov: zidane in armiranobetonske konstrukcije stavb. IKPIR, 1995.

Pravilnik o začasnih tehničnih predpisih za gradnjo na seizmičnih področjih. Ur. l. SFRJ, št. 39/1964, 1964.

Sheppard, P., Tomaževič, M., Izhodišča in kriteriji za ugotavljanje potresne ranljivosti zidanih zgradb. Ljubljana, december 1986. (Št. IKPI-86/11). Ljubljana: ZRMK, 1986.

Šket Motnikar, B., Zupančič, P., Karta intenziteta EMS. ARSO, GURS, Pridobljeno: https://potresi.arso.gov.si/doc/dokumenti/potresna_nevarnost/intenziteta_resevanje.jpg, 2011.

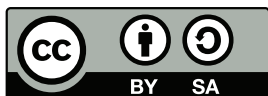
Šket Motnikar, B., Zupančič, P., Živčič, M., Atanackov, J., Jamšek Rupnik, P., Čarman, M., ... Gosar, A., Tolmač karte: Nova karta potresne nevarnosti Slovenije (2021) za namen projektiranja potresno odpornih stavb. ARSO, Urad za seizmologijo, MOP, Pridobljeno: https://potresi.arso.gov.si/doc/dokumenti/potresna_nevarnost/Tolmac_karte_potresne_nevarnosti_2021.pdf, 2021.

Stavbinski red za občinsko ozemlje deželnega stolnega mesta Ljubljane, Deželni zakonik št. 28, XXI. kos. Ljubljana, 1896.

Tomaževič, M., Potresno odporne zidane stavbe. Ljubljana: Tehnis, 2009.

Tomaževič, M., Lapajne, J., Sheppard, P., Bergant, M., Lutman, M., Codec, M., Vidrih, R., Potresna ogroženost mesta Ljubljane. Ljubljana: ZRMK: Seizmološki zavod R Slovenije, 1991. 2 zv. (24, 102 str.), ilustr. [COBISS.SI-ID 349287], (No. 2. zvezek) (p. 102). Ljubljana: ZRMK, Seizmološki zavod R Slovenije, 1991.

Ur. list SRFJ št. 31, Pravilnik o tehničnih normativih za graditev objektov visoke gradnje na seizmičnih območjih, 1981.



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 vzorčnih 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.

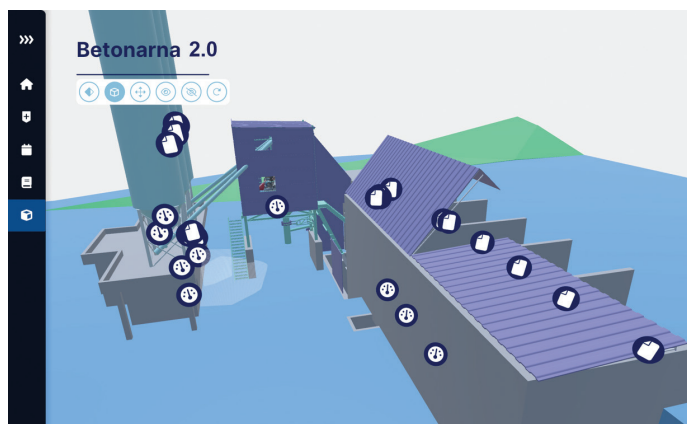
Betonarna Nagonje 2.0 predstavlja referenčni primer integracije digitalnih tehnologij in visoke stopnje avtomatizacije v proizvodnji betona, kar jo uvršča med pametne proizvodne obrate skladno z načeli Industrije 4.0. Ključne tehnološke rešitve vključujejo vgradnjo IoT-senzorjev za spremljanje fizikalnih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

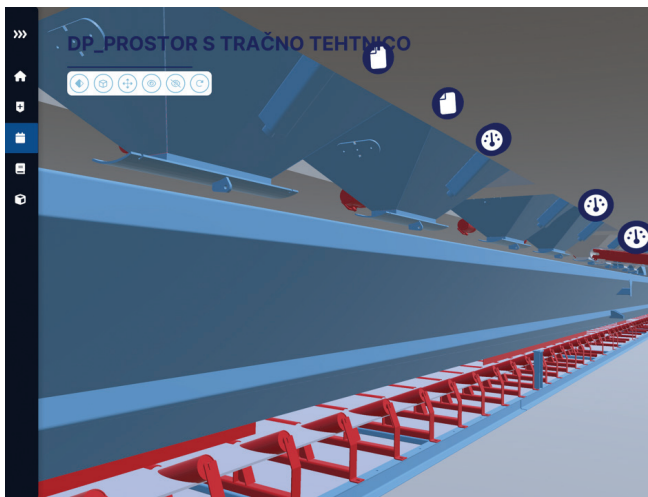
betonarno. Poseben sistem DT vključuje protokole za varno delovanje betonarne, kot je denimo zagotavljanje, da so vse varnostne naprave nameščene in pravilno delujejo, preden se proizvodni proces začne.

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 energetsko 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., Obrecht 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.