

Gradbeni vestnik

GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE IN
MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKA ZBORNICE SLOVENIJE



53

POTRESI V FURLANJI LETA 1976 IN
ZAVOD ZA RAZISKAVO MATERIALA IN
KONSTRUKCIJ

72

UMETNA INTELIGENCA KOT
PARTNER V ARHITEKTURI:
PRILOŽNOSTI IN IZZIVI

94

INTEGRACIJA PODATKOV O PROMETNIH
NESREČAH, SIMULATORJA VOŽNJE
IN OČAL ZA SLEDENJE POGLEDA
ZA ANALIZO VEDENJA SLOVENSkih
STAREJŠIH VOZNIKOV V PROMETU

121

ANALIZA RAZLIČNIH METOD
DIMENZIONIRANJA METEORNE
KANALIZACIJE NA PRAKTIČNEM
PRIMERU

63

VPLIV ORIENTACIJE ROBNIH
POGOJEV NA VELIKOST
UKLONSKIH SIL HOMOGENIH
ELASTIČNIH STEBROV

82

VPLIV TEMPERATURE IN DUŠENJA
NA VIBRACIJE BRVI Z NOSILNIM
SISTEMOM NATEZNEGA TRAKU:
ŠTUDIJA PRIMERA BRVI V IRČI VASI

109

VPLIV ČASOVNIH ZAMIKOV
PRENOSA PROMETNIH
INFORMACIJ Z UPORABO
ITS IN C-ITS SISTEMOV

Izdajatelj:

Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS),
Karlovska cesta 3, 1000 Ljubljana,
telefon 01 52 40 200
v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije (IZS MSG),**
ob finančni podpori **Javne agencije za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost RS, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, Fakultete za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo Univerze v Mariboru in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **prof. dr. Matjaž Mikoš, predsednik**
izr. prof. dr. Andrej Kryžanowski
dr. Miha Jukič
IZS MSG: **dr. Rok Cajzek**
mag. Jernej Nučič
Tina Bučič
UL FGG: **izr. prof. dr. Matija Gams**
UM FGPA: **prof. dr. Miroslav Premrov**
ZAG: **doc. dr. Aleš Žnidarič**

Uredniški odbor: **izr. prof. dr. Primož Može,**
glavni in odgovorni urednik
prof. dr. Uroš Klanšek
dr. Maja Kreslin

Lektor: **Davorin Kolarič**

Lektorica angleških povzetkov:
Romana Hudin

Tajnica: **Eva Okorn**

Oblikovalska zasnova: **Agencija GIG**

Tehnično urejanje, prelom in tisk:
Kočevski tisk

Naklada: 400 tiskanih izvodov
3000 naročnikov elektronske verzije

Podatki o objavah v reviji so navedeni v bibliografskih bazah COBISS in ICONDA (The Int. Construction Database) ter na www.zveza-dgits.si

Letno izidejo 4 številke. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 25,50 EUR; za študente in upokojene 10,50 EUR; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 188,50; za naročnike iz tujine 88,00 EUR.

V ceni je vštete DDV.
Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:
SI56 0201 7001 5398 955

Slika na naslovnici:

Most preko Savinje na Polulah pri Celju
Foto: Ponting inženirski biro d.o.o

Glasilno Zveze društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije in
Matične sekcije gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije.
UDK-UDC 05 : 625; tiskana izdaja ISSN 0017-2774;
spletna izdaja ISSN 2536-4332.
Ljubljana, junij 2026, letnik 75, str. 49-148

Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

1. Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
2. Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
3. Članki (razen angleških povzetkov) in prispevki morajo biti napisani v slovenščini.
4. Besedilo mora biti zapisano z znaki velikosti 12 točk in z dvojnimi presledkom med vrsticami.
5. Prispevki morajo vsebovati naslov, imena in priimke avtorjev z nazivi in naslovi ter besedilo.
6. Članki morajo obvezno vsebovati: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); znanstveni naziv, imena in priimke avtorjev, strokovni naziv, navadni in elektronski naslov; oznako, ali je članek strokoven ali znanstven; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; ključne besede v slovenščini; naslov SUMMARY in povzetek v angleščini; ključne besede (key words) v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); ... naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so ti označeni še z A, B, C itn.
7. Poglavja in razdelki so lahko oštevilčeni. Poglavja se oštevilčijo brez končnih pik. Denimo: 1 UVOD; 2 GRADNJA AVTOCESTNEGA ODSEKA; 2.1 Avtocestni odsek ... 3 ...; 3.1 ... itd.
8. Slike (risbe in fotografije s primerno ločljivostjo) in preglednice morajo biti razporejene in omenjene po vrstnem redu v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino.
9. Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
10. Kot decimalno ločilo je treba uporabljati vejico.
11. Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki oglatih oklepajev: [priimek prvega avtorja ali kratica ustanove, leto objave]. V istem letu objavljena dela istega avtorja ali ustanove morajo biti označena še z oznakami a, b, c itn.
12. V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela razvrščena po abecednem redu priimkov prvih avtorjev ali kraticah ustanov in opisana z naslednjimi podatki: priimek ali kratica ustanove, začetnica imena prvega avtorja ali naziv ustanove, priimki in začetnice imen drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
13. Način objave je opisan s podatki: knjige: založba; revije: ime revije, založba, letnik, številka, strani od do; zborniki: naziv sestanka, organizator, kraj in datum sestanka, strani od do; raziskovalna poročila: vrsta poročila, naročnik, oznaka pogodbe; za druge vrste virov: kratek opis, npr. v zasebnem pogovoru.
14. Prispevke je treba poslati v elektronski obliki v formatu MS WORD glavnemu in odgovornemu uredniku na e-naslov: primoz.moze@fgg.uni-lj.si. V sporočilu mora avtor napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren.

Uredništvo

Prispevki v Gradbenem vestniku so odprto dostopni v skladu z licenco CC BY-SA 4.0.



izr. prof. dr. Primož Može, univ. dipl. inž. grad.

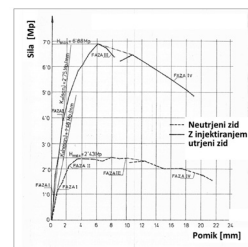
52

PREDGOVOR

akad. prof. dr. Miha Tomaževič, univ. dipl. inž. grad.

**POTRESI V FURLANJI LETA 1976 IN ZAVOD
ZA RAZISKAVO MATERIALA IN KONSTRUKCIJ
FRIULI EARTHQUAKES OF 1976 AND THE
INSTITUTE FOR TESTING AND RESEARCH IN
MATERIALS AND STRUCTURES**

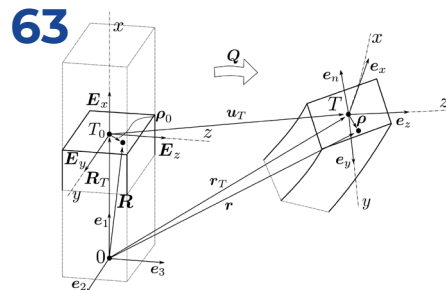
53



dr. Peter Kočman, mag. inž. teh. var.

**VPLIV ORIENTACIJE ROBNIH
POGOJEV NA VELIKOST UKLONSKIH
SIL HOMOGENIH ELASTIČNIH STEBROV
INFLUENCE OF THE END-SUPPORTS
ORIENTATION ON MAGNITUDE OF THE
BUCKLING LOAD OF HOMOGENEOUS
ELASTIC COLUMNS**

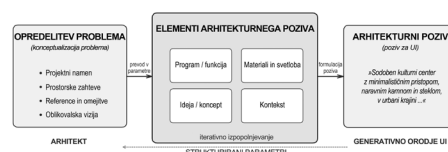
63



doc. dr. techn. Marko Jaušovec, univ. dipl. inž. arh.
asist. Samo Lorber, mag. inž. arh.

**UMETNA INTELIGENCA KOT PARTNER V
ARHITEKTURI: PRILOŽNOSTI IN IZZIVI
ARTIFICIAL INTELLIGENCE AS A PARTNER
IN ARCHITECTURE: OPPORTUNITIES AND
CHALLENGES**

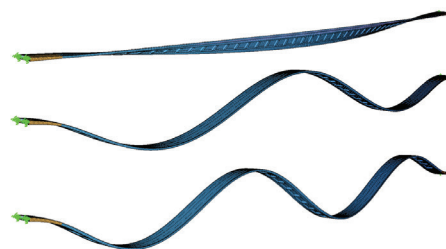
72



Martina Stopar, mag. inž. grad.
doc. dr. Bojan Čas, univ. dipl. inž. grad.
doc. dr. Peter Češarek, univ. dipl. inž. grad.

**VPLIV TEMPERATURE IN DUŠENJA NA
VIBRACIJE BRVI Z NOSILNIM SISTEMOM
NATEZNEGA TRAKU: ŠTUDIJA
PRIMERA BRVI V IRČI VASI
THE INFLUENCE OF TEMPERATURE AND
DAMPING ON THE VIBRATIONS OF A STRESS
RIBBON FOOTBRIDGE: CASE STUDY OF
FOOTBRIDGE IN IRČA VAS**

82



VSEBINA CONTENTS

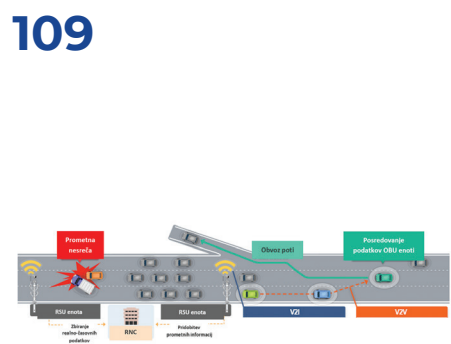
asist. Anamarija Poll, mag. inž. prom.
red. prof. dr. Tomaž Tollazzi, univ. dipl. inž. grad.
doc. dr. Chiara Gruden, dott. mag., Republika Italija

INTEGRACIJA PODATKOV O PROMETNIH NESREČAH, SIMULATORJA VOŽNJE IN OČAL ZA SLEDENJE POGLEDA ZA ANALIZO VEDENJA SLOVENSКИH STAREJŠIH VOZNIKOV V PROMETU **INTEGRATION OF TRAFFIC ACCIDENT, DRIVING SIMULATOR AND EYE-TRACKING DATA TO STUDY THE DRIVING BEHAVIOUR OF ELDERLY SLOVENIAN DRIVERS**



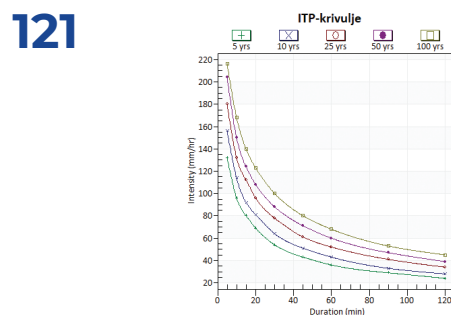
Iva Meglič, mag. inž. prom.
red. prof. dr. Matjaž Šraml, univ. dipl. inž. str.
mag. Ulrich Zorin, univ. dipl. inž. prom.
doc. dr. Chiara Gruden, dott. mag., Republika Italija

VPLIV ČASOVNIH ZAMIKOV PRENOSA PROMETNIH INFORMACIJ Z UPORABO ITS IN C-ITS SISTEMOV **THE IMPACT OF TIMEDELAYS IN TRAFFIC INFORMATION TRANSMISSION USING ITS AND C-ITS SYSTEMS**



Eva Munda, mag. inž. grad.
Živa Hanžič, M. Sc. REAP
izr. prof. dr. Janja Kramer Stajniko, univ. dipl. inž. grad.

ANALIZA RAZLIČNIH METOD DIMENZIONIRANJA METEORNE KANALIZACIJE NA PRAKTIČNEM PRIMERU **COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR STORMWATER SEWER SYSTEM DESIGN ON A PRACTICAL CASE STUDY**



FOTOREPORTAŽE Z GRADBIŠČ

Gregor Cipot
Marko Živec

MORAVSKI KORIDOR E-761 POJATE–PRELJINA (SRBIJA) & KORIDOR 8 IN 10D TETOVO– BUKOJČANI, PRILEP–BITOLA (SEVERNA MAKEDONIJA)



VSEBINA CONTENTS

Luka Medvešek
Nora Pavičević
TEHNOLOŠKI INKUBATOR TechHUB i4.0

137



Jerneja Sklepič Erklavec
Matej Hribernik
**VEČSTANOVANJSKI OBJEKT
SONČNE LIVADE KRANJ**

141



OBVESTILO ZDGITS

**ZADNJI PRIPRAVLJALNI SEMINAR IN IZPITNI
ROK ZA STROKOVNE IZPITE ZA GRADBENO
STROKO V LETU 2026**

148

NOVI DIPLOMANTI

Eva Okorn

KOLEDAR PRIREDITEV

Eva Okorn

izr. prof. dr. Primož Može, univ. dipl. inž. grad.



PREDGOVOR

Spoštovane bralke, spoštovani bralci,

prvič se vam oglašam kot glavni in odgovorni urednik revije Gradbeni vestnik. Zahvaljujem se izdajateljskemu svetu za izkazano zaupanje. Vlogo sem prevzel z občutkom odgovornosti, pa tudi z iskrenim veseljem in željo, da skupaj z vami soustvarjamo razvoj revije, ki ima v slovenskem prostoru dolgo in pomembno tradicijo.

Pred vami je številka, ki prinaša sedem znanstvenih in strokovnih člankov. Izstopa prispevek akad. prof. dr. Mihe Tomaževiča, posvečen 50. obletnici potresov v Furlaniji. Ob prebiranju prispevka se ne moremo izogniti razmisleku o pomenu znanja, izkušenj in sodelovanja v stroki. Članek ne pomeni le obeležitve ene najhujših naravnih nesreč v širši regiji, temveč poudarja izjemno vlogo slovenskih raziskovalcev in inženirjev pri razvoju sodobnega potresnega inženirstva ter prenosu znanja v mednarodno okolje.

Sodobni razvoj gradbeništva in arhitekture vse bolj zaznamuje uporaba umetne inteligence. V tej številki predstavljamo članek, ki prikazuje, kako arhitekti uporabljajo orodja umetne inteligence v procesu načrtovanja. To področje odpira številne priložnosti, hkrati pa prinaša nova vprašanja, na katera bo stroka morala odgovoriti.

Ljubitelje mehanike vabim k branju prispevka dr. Petra Kočmana o vplivu orientacije robnih pogojev na kritično uklonsko silo, ki prinaša poglobljen vpogled v temeljne zakonitosti stabilnosti konstrukcij.

Zadnji štirje prispevki so delo kandidatov za priznanje dr. Darka Bega za najboljše magistrsko delo na področju gradbeništva, okoljskega, prometnega in gospodarskega inženirstva za leto 2025, ki ga podeljuje Inženirska zbornica Slovenije. Gre za mlade strokovnjake, ki s svojimi raziskavami in idejami že pomembno sooblikujejo prihodnost naše stroke. Priznanje dr. Darka Bega sta prejela Martina Stopar in Danijel Kirn. V tej številki ste vabljeni k branju članka z naslovom Vpliv temperature in dušenja na vibracije brvi z nosilnim sistemom nateznega traku: študija primera brvi v Irči vasi, delo, za katero je Martina Stopar prejela navedeno priznanje.

Poleg znanstvenih in strokovnih člankov številko dopolnjujejo tri fotoreportaže aktualnih projektov, s katerimi domači inženirji pomembno prispevajo h kakovosti grajenega okolja.

Ob zaključku vas vabim k rednemu branju revije ter k aktivnemu soustvarjanju njene vsebine. Gradbeni vestnik je skupen prostor slovenske gradbene stroke – prostor srečevanja idej, izkušenj in dosežkov. Vesel bom vaših prispevkov, pobud in odzivov.

Želim vam prijetno branje.

izr. prof. dr. Primož Može, univ. dipl. inž. grad.
glavni in odgovorni urednik



akad. prof. dr. Miha Tomažević, univ. dipl. inž. grad.

miha.tomazevic@zag.si
Zavod za gradbeništvo Slovenije,
Dimičeva 12, 1000 Ljubljana



Strokovni članek

UDK/UDC: 699.841(450.36) "1976"

POTRESI V FURLANIJI LETA 1976 IN ZAVOD ZA RAZISKAVO MATERIALA IN KONSTRUKCIJ FRIULI EARTHQUAKES OF 1976 AND THE INSTITUTE FOR TESTING AND RESEARCH IN MATERIALS AND STRUCTURES

Povzetek

Leta 1976 je vrsta treh potresov prizadela širše območje Furlanije in obmejnega Posočja. ZRMK (Zavod) je po majskem potresu v Posočju strokovno vodil in koordiniral oceno uporabnosti in poškodovanosti objektov. Ker se v Posočju resnejša akcija obnove ni niti začela, je bilo treba septembra ponoviti tudi oceno uporabnosti in na novo ovrednotiti škodo. Po septembrskih potresih je Zavod dodatno izobraževal sodelujoče pri obnovi, koordiniral delo ocenjevalnih skupin ter svetoval pri reševanju zapletenih problemov, njegovi operativci pa so usposabljali izvajalce in izvajali zahtevnejša utrditvena dela. V okviru pomoči Slovenije zamejskim Slovencem je Zavod usmerjal delo slovenskih inženirjev, ki so pripravljali podatke za projektiranje obnove stavb, ter usposabljal zaposlene v podjetju zamejskih Slovencev, ustanovljenem za sanacijo po potresu poškodovanih hiš. Ker se je metoda za utrjevanje, ki jo je predlagal Zavod, med septembrsko ponovitvijo potresov izkazala za učinkovito, je Zavod na povabilo Inženirske zbornice iz Vidma svoje znanje in izkušnje prenesel furlanskemu projektantskemu in operativnemu kadru. Zavod je odigral ključno vlogo tudi pri pripravi priporočil za rekonstrukcijo poškodovanih objektov, katerih uporabo je uzakonila pokrajinska vlada Furlanije - Julijske krajine.

Ključne besede: furlanski potres, obnova, sodelovanje, metode utrditve, priporočila za projektiranje

Summary

In 1976, a series of three earthquake events struck Friuli, Italy, and the Soča River Valley in Slovenia. After the May event, ZRMK (the Institute) was assigned to coordinate the assessment of building usability and damage in Slovenia. Lacking serious reconstruction after May, the assessment had to be repeated in September. Besides coordinating the re-assessment, the Institute provided consultation and trained the staff of companies participating in the reconstruction. Within the framework of Slovenia's assistance to the Slovenian minority living across the border, the Institute coordinated the work of Slovenian experts assigned to provide information needed for the re-design, and trained the staff of a construction company established to retrofit earthquake-damaged houses in the area. During the September events, the method of strengthening proposed by the Institute, proved to be effective. Consequently, the Chamber of Engineers in Udine invited the Institute's experts to share their knowledge and experience with Friulian colleagues participating in the reconstruction. In addition, the Institute played a key role in the Friulian expert group, drafting the recommendations for reconstruction, issued as compulsory by the regional government.

Key words: Friuli earthquake, reconstruction, collaboration, strengthening methods, design recommendations

1 UVOD

Varstvo pred potresi je bolj kot pri drugih naravnih nesrečah osnovano na dejstvu, da potresov ne moremo preprečiti, lahko pa ublažimo njihove posledice na sprejemljiv obseg. Znana misel, da "ne ubijajo potresi, pač pa stavbe, ki se med potresi porušijo", nam pove, da posledice potresov najbolje ublažimo tako, da se bodisi izognemo gradnji na potresnih območjih bodisi gradimo objekte, ki jih potresi ne bodo poškodovali ali porušili.

Kot so nesporno dokazali močni potresi, ki so v zadnjem času prizadeli dežele razvitega sveta, današnje znanje o potresno-odporni gradnji omogoča, da celo najzahtevnejši sodobni objekti po potresu ostanejo uporabni oziroma potrese preživijo z zanemarljivim obsegom poškodb. A lahko nekaj podobnega rečemo tudi za stare zidane stavbe, ki so pomemben del gradbenega fonda v mestnih in podeželskih jedrih, hkrati pa pomenijo arhitekturno kulturno dediščino neprecenljive vrednosti? Težko, saj so bile med nedavnimi močnimi potresi, ki so prizadeli evropska stara mestna in podeželska jedra, najbolj prizadete prav zgodovinske zidane stavbe. O razlogih za to na tem mestu ne bomo razpravljali.

Ko so furlanski potresi maja in septembra leta 1976 ponovno pokazali, da potresi ne poznajo meja, smo se na obeh straneh meje, kjer je tipologija podeželskih pa tudi mestnih starih stavb zelo podobna, šele učili, kako takšne stavbe narediti bolj odporne proti potresu. Furlanski potresi leta 1976 so za razumevanje obnašanja starih stavb med potresom in poznavanju razlogov, zakaj takšne, kot so bile zgrajene, večinoma niso odporne proti potresu, pomenili prelomnico. Ravno tako so pomenili prelomnico v razvoju nabora tehničnih rešitev, kako takšne stavbe utrditi, da bodo postale bolj odporne proti potresu. Tako so se šele po potresih leta 1976 začele izvajati bolj ali manj sistematične raziskave, povezane s potresno odpornostjo starih zidanih hiš. Na podlagi teh, tudi mednarodno koordiniranih raziskav so bile razvite metode in tehnološke rešitve, s katerimi lahko danes arhitekturno kulturno dediščino obvarujemo pred posledicami rušilnih potresov. Le pravočasno jih moramo uporabiti.

Po furlanskem potresu smo se učili tudi tisti, ki smo že imeli nekaj izkušenj. Še bolj in še več pa so se morali naučiti kolegi, ki smo jim svoje izkušnje takrat prenesli. Nekaj o tem, kako se je slovenska stroka, ki so jo na tem področju predstavljali predvsem sodelavci takratnega Zavoda za raziskavo materiala in konstrukcij (ZRMK, v nadaljevanju tudi Zavod), današnjega Zavoda za gradbeništvo Slovenije (ZAG) iz Ljubljane, odzvala na furlanski potres na obeh straneh meje in kaj je njeno sodelovanje pri odpravi posledic potresa takrat pomenilo, bomo predstavili v nadaljevanju.

2 IZKUŠNJE ZRMK PRED POTRESI LETA 1976

Čeprav so slovenski strokovnjaki, ki so se zavedali, da potresno-odporna gradnja kljub potresni nevarnosti v nekdanji Jugoslaviji ni ustrezno urejena s predpisi, in so po lokalnem potresu leta 1956 v Ilirski Bistrici začeli pripravljati ustrezno slovensko tehnično regulativo [Uradni list SRS, 1963], je resnejši mejnik v dejavnosti pomenil šele potres leta 1963, ki je prizadel Skopje,

glavno mesto Makedonije. Mimogrede, slovenska priporočila za projektiranje, ki so izšla tik pred skopskim potresom, so leta 1964 z nekaterimi spremembami in dopolnitvami postala jugoslovanski začasni tehnični predpis za projektiranje na potresnih območjih [Uradni list SFRJ, 1964]. Sloveniji, in s tem Zavodu za raziskavo materiala in konstrukcij kot njeni takrat edini raziskovalni instituciji za gradbeništvo, ki je imel na področju sanacij gradbenih konstrukcij že nekaj izkušenj, je bila po potresu leta 1963 poverjena predvsem skrb za zidane stavbe.

Zvezna država (takratni jugoslovanski Zvezni fond za znanstvena raziskovanja) je po potresu v Skopju financirala obsežen program raziskav obnašanja zidov pri potresni obtežbi ter preverjanja učinkovitosti nekaterih metod utrjevanja opečnih zidov (injektiranje razpok, prednapetje, oblaganje z armirano cementno oblogo), ki so bile uporabljene pri sanaciji poškodovanih stavb, ki so preživele potres. Najpomembnejši rezultat teh raziskav je bila enačba za izračun strižne odpornosti zidov, ki jo je predlagal takratni direktor Zavoda in iniciator eksperimentalnega raziskovanja na področju potresno-odporne gradnje pri nas Viktor Turnšek [Turnšek, 1971]. Enačba se zaradi enostavnosti in inženirske vrednosti še danes uporablja, z manjšimi posodobitvami pa je bila vpeljana v kasnejše jugoslovanske in nekatere tuje predpise.

Za eksperimentalne raziskave, s katerimi naj bi se ponazoril vpliv potresnih sil, je bilo treba prirediti tudi preizkuševalno opremo. Zato so že konec šestdesetih let prejšnjega stoletja raziskovalci Zavoda skupaj s švicarskim podjetjem Amsler, ki je do takrat dobavilo večino hidravlične preizkuševalne opreme, zasnovali eno prvih potresnih miz v Evropi. Istočasno so zasnovali posebno napravo za preiskave zidov (slika 1), ki je omogočila ovrednotenje parametrov, ki jih potrebujemo v računskih analizah potresne odpornosti.

Potresna miza in naprava za ciklične strižne preiskave zidov nista bili fiksni napravi, saj je laboratorij za konstrukcije opremo želel izkoristiti tudi za druge namene. Za svojo postavitve sta potrebovali poseben temelj, ki je danes del preizkuševalne ploščadi laboratorija, 110 cm debelo, s stenami podprto močno armiranobetonsko ploščo, ki ima v rastru 120 × 120 cm predvidena pritrdišča za jekleno oporno konstrukcijo, ki se jo da prilagoditi vsakokratni preiskavi. Kletni prostor, v katerem so danes in po razširitvi temelja sredi osemdesetih let nameščeni hidravlični agregati za pogon programskih batov, je dovolj visok, da se na strop temelja po potrebi lahko pritrdijo bati za vnos navpično delujočih sil.

Zmogljivost potresne mize je bila skromna, omejena na skupno maso premikajočih se delov v velikosti 2500 kg, zato se je z njo raziskovalo le obnašanje konstrukcij v zmanjšanem merilu – modelov, in ne konstrukcij v naravni velikosti. Da bi bili rezultati modelnih preiskav zanesljivi, je bilo treba osvojiti tehniko fizičnega modeliranja konstrukcij in obtežbe ter razviti ustrezne materiale za modeliranje betona, armature in zidovja ([Boštjančič, 1968], [Čačovič, 1970]). Tudi zmogljivost naprave za strižne preiskave zidov je bila omejena. Dimenzionirana je bila za preiskave nearmiranih zidov s strižno odpornostjo, ki ne presega 250 kN.

Velik zadržek za izvedbo dinamičnih preiskav sta v tistem obdobju predstavljala tudi zelo skromna analogni merilni sistem in sistem za zajemanje podatkov. Meritve fizikalnih veličin so bile v tistem času omejene na meritve ključnih pomikov,

pospeškov, deformacij in sil, zato je bilo treba merilna mesta pred preiskavo skrbno izbrati. Težavna je bila tudi obdelava rezultatov, saj je bilo treba vse analogne zapise pred resnejšo analizo ročno digitalizirati.

Skopskemu potresu je leta 1969 sledil rušilni potres v Banjaluki, kjer je Zavod ponovno odigral ključno vlogo pri sanaciji in utrditvi nekaterih pomembnejših zidanih pa tudi armiranobetonskih javnih stavb. V okviru obnove mesta je Zavod za obnovo Banjaluke, ki je upravljal tudi s sredstvi zvezne pomoči, financiral obsežne raziskave, s katerimi so bile raziskane mehanske lastnosti tipičnega zidovja. Zato so bili iz nekaterih večstanovanjskih stavb v mestu izrezani zidovi v velikosti običajnih preizkušancev, ki so bili varno prepeljani v Ljubljano in preiskani v novi napravi. Podatki so bili uporabljeni pri projektiranju utrditvenih ukrepov, pri čemer je Zavod sodeloval z Inštitutom za potresno inženirstvo in inženirsko seizmologijo (IZIIS) iz Skopja (današnja Republika Severna Makedonija). Da bi dobili zanesljivejšo oceno potresne odpornosti, je Zavod na podlagi analiz poškodb po potresu in rezultatov laboratorijskih raziskav predlagal spremembo načina razporeditve potresnih sil po zidovih. Nova metoda je temeljila na strižnem in ne na upogibnem mehanizmu obnašanja zidane konstrukcije, kot je bilo pred tem v navadi [Turnšek, 1972].

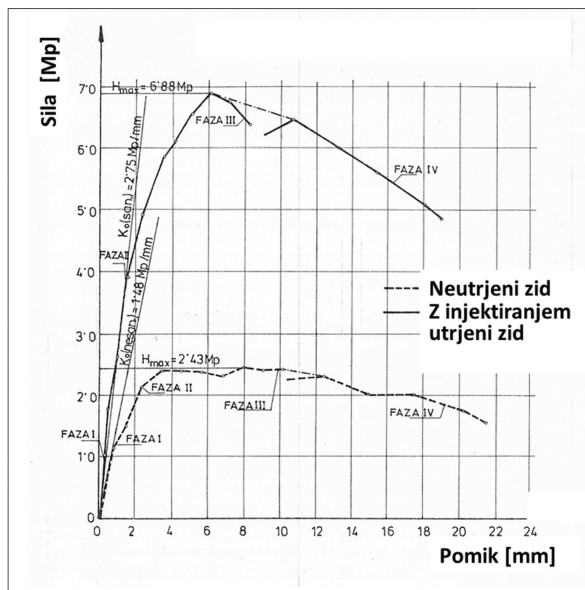
Potresa v Skopju in Banjaluki sta vzbudila tudi zanimanje tuje strokovne javnosti, tako da je skupaj s pomočjo prizadetih območjem iz tujine prišla pobuda za znanstvenoraziskovalno sodelovanje. Da bi se seznanili z Zavodovimi raziskavami zidanih konstrukcij, so v začetku sedemdesetih let Zavod obiskali predstavniki Univerze v Kaliforniji iz Berkeleyja. Poznavanje problematike in opravljeno raziskovalno delo sta naredila dober vtis, tako da so bile Zavodove raziskave opisane v poročilu berkeleyjske univerze o stanju stroke na tem področju in vključene v raziskave na področju potresnega inženirstva v okviru ameriško-jugoslovanskega znanstveno-tehnološkega sodelovanja. To je dalo Zavodovim raziskavam obnašanja zidanih konstrukcij dodatno težo.

Leta 1974 se je zgodil potres na Kozjanskem, sicer manjši potres, ki je resneje prizadel eno takrat najrevnejših območij v Sloveniji z večinoma kamnitimi zidanimi hišami. Zavodu sta bila poverjena strokovno vodenje ugotavljanja uporabnosti prizadetih stavb in skrb za tehnične rešitve pri popotresni obnovi. Zavod je po potresu na Kozjanskem vodil popis poškodovanosti hiš, za kar je s sodelavci Fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo ljubljanske Univerze pripravil vprašalnik (anketni list), ki je omogočil kasnejšo računalniško obdelavo podatkov, ugotovljenih na terenu. Na podlagi stanja na terenu, analize poškodb stavb in izkušenj pri sanaciji kamnitih mostov so Zavodovi raziskovalci kot najustreznejšo rešitev za utrjevanje predlagali injektiranje kamnitega zidovja s cementnimi injektacijami in povezovanje zidovja z jeklenimi vezmi. Učinke enostavne in ekonomsko sprejemljive metode so preverili z laboratorijskimi preiskavami odpornosti injektiranih zidov (slika 1, [Terčelj, 1976]) in s preiskavo obnašanja modela enostavne povezane hiše na potresni mizi (slika 2, [Boštjančič, 1976]). Zavod je pripravil tudi navodila, kako vgrajevati zidne vezi [Vuigrinec, 1977], na podlagi rezultatov preiskav obstoječih in injektiranih kamnitih zidov, sezidanih iz lokalnega materiala, pa priporočil vrednosti mehanskih lastnosti zidovja, ki naj bi jih v izračunih potresne odpornosti upoštevali projektanti.

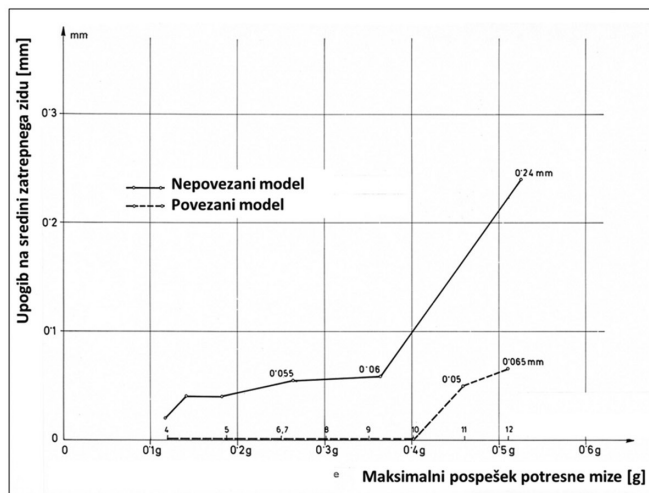
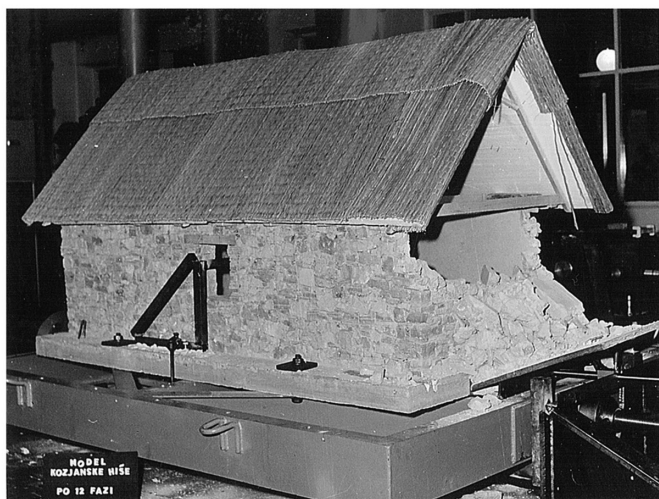
3 DEJAVNOSTI PO FURLANSKIH POTRESIH LETA 1976

3.1 Dejavnosti doma

Leta 1976 so se zgodili furlanski potresi (pravzaprav zaporedje treh potresov: 6. maja ter 5. in 11. septembra 1976), ki so opustošil večji del Furlanije in močno prizadel tudi Posočje (slika 3). Potresi so porušili oziroma poškodovali večinoma stare kamnite hiše, zato so bile izkušnje, pridobljene po potresu na Kozjanskem, zelo dragocene. Po maju 1976 je Zavod tako kot na Kozjanskem tudi na območju širšega Posočja koordiniral



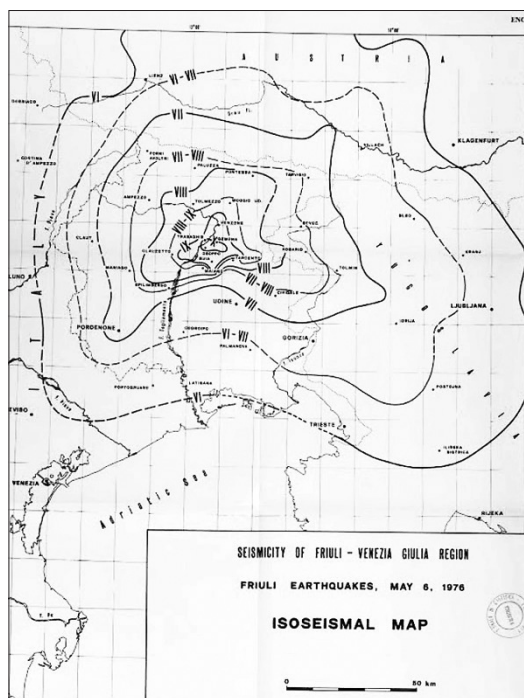
Slika 1. Preiskava kamnitega zidu po potresu na Kozjanskem leta 1974. Levo: zid v preizkuševalni napravi, desno: učinek injektiranja [Terčelj, 1976]



Slika 2. Preiskava modela enostavne kamnite hiše na potresni mizi. Levo: pri hiši brez vezi se je porušil zatrejni zid, desno: upogib, izmerjen na sredini zatrepnega zidu, v odvisnosti od jakosti potresnega vzbujanja [Boštjančič, 1976]

ocenjevanje uporabnosti po potresu prizadetih objektov hiš. Na Kozjanskem uporabljeni vprašalnik je bil razširjen, tako da je poleg ugotovitve o uporabnosti stavb (vseljiva – začasno nevseljiva – porušena, nepopravljivo poškodovana) vseboval tudi podatke o obsegu poškodb in obsegu potrebnih sanacijskih ukrepov oziroma škodi. Po odločitvi slovenske vlade se je škoda ocenjevala na podlagi vrednosti del, potrebnih za odstranitev posledic potresa in ne na podlagi »zavarovane« vrednosti hiš. Zato je bilo treba v vprašalniku navesti, katera od navedenih del pridejo v poštev pri sanaciji stavbe, in to tudi količinsko ovrednotiti (slika 4).

Po majskem potresu so bila popravila poškodovanih hiš v Posočju namenjena čimprejšnji vselitvi. Bila so bolj ali manj kozmetične narave (zamenjava poškodovane kritine, zapiranje in krpanje razpok z ometom). V največji meri so jih brez strokovne pomoči izvajali kar lastniki sami, ki so jim pri delih na pomoč priskočile tudi mladinske delovne brigade. Čeprav so bile metode utrjevanja poznane že po potresu na Kozjanskem, se na slovenski strani v Posočju sistematična akcija, v okviru katere naj bi se poškodovane hiše tudi protipotresno utrdile, ni začela takoj po potresu. Akcijski plani o tem, kdo bo izvajal utrditvene ukrepe in kdo oziroma kako jih bo financiral, naj bi bili pripravljene šele na podlagi analize škode.



Slika 3. Seizmološka karta potresa 6. maja 1976 [Giorgetti 1976]

Tako sta septembrska potresa prehitela izvajanje strokovno podprtih utrditvenih ukrepov in žal dokončala, kar je majski potres začel. Še posebno to velja za stavbe arhitekturne kulturne dediščine v Breginjskem kotu, kjer se kljub že nekaj let pred potresom pripravljenim načrtom prenove in oživiljanja krajev, poleti 1976 ni zgodilo skoraj nič. Politično obarvane polemike, zakaj je bil izgubljen stari Breginj in kako bi se ga dalo rešiti, se še danes niso polegale.

Septembrska potresa sta maja načete in neustrezno utrjene hiše na obeh straneh meje dodatno poškodovale, mnoge težko poškodovane porušila in postavila na glavo že opravljeno delo v prvi fazi obnove. Ponovno je bilo treba oceniti uporabnost hiš in izdelati načrte, na podlagi katerih naj bi hiše utrdili. Tokrat je Slovenija akcijo resneje zastavila s ciljem, da nihče od prizadetih bližajoče se zime ne sme preživeti v začasnem bivališču. Da bi dosegla cilj in prizadeto območje prenovila do božiča oziroma do konca leta 1976, je takratna Socialistična republika Slovenija angažirala projektantska podjetja in gradbeno operativno, ki so na teren poslali najbolj izkušene statike in arhitekta ter operativce z vso potrebno mehanizacijo. Hkrati je ocenila, da lahko zaradi tipologije poškodovanih hiš in poznanih tehničnih rešitev, katerih učinki so bili že preverjeni (eksperimenti na Zavodu in primer hiše v Bardu, glej poglavje 3.2), poenostavi izdelovanje projektov utrditve. Namesto pra-

Zavod za raziskavo materiala in konstrukcij ljubljana

ANKETNI LIST

o posledicah potresa 6. maja 1976

1. Komisija za popis in oceno posledic potresa na stavbah
Predsednik:
član:
za kraj skupnat:

2. Lastnik ali gospodar
Itev. stanovanjski oddali
stroci do 16 let

3. Lokacija objekta
Občina:
Krajevno skupnat:
Kraj:
Hiša številka:

4. Ali je objekt spomeniško zaščiteno? DA = NE *

5. Podatki o objektu *

a. DRUŽBENI : stanovanjska - kmetijska gospodarka - proizvodna - zdravstvena - gostilni dom - šola - šola s stanov. - upravne zgradbe - ostalo.

b. ZASEBNI : stanovanjska - kmetijska gospodarka - ostalo.

c. SAKRALNI: cerkev - župnišča - ostalo.

dostopni: s tavanjskim - z vzorom - neprevidno steno (ocene) : let
etaz. klet, prižliže, II. etaz., mansarda m²
bivna tlesnina navzgor objekta m²
neto stanovanjsko površino: m²

Gradnja:
temeľev (fabceno) : - les - kamnit - betonski - opečni
nosilnih zidov kleti: - kamnit - betonski - opečni
nosilnih zidov etaz.: - kamnit - opečni - opečni
nosilnih zidov: - kamnit - opečni - leseni - opečni
preložišča: - leseni - opečni - betonski - opečni

KATEGORIJA

- stropov nad kletjo: - opečni/kamnitih etaz. - leseni - opečni/plašče - montažni
- stropov nad prižližje: - opečni/kamnitih etaz. - leseni - opečni/plašče - montažni
- stropov nad etazami: - leseni - opečni/plašče - montažni
- ostrižja: - leseno - betonsko - jekleno
- kritina: - kofci na planinah - zorezniki - solonci - slona - skodlje - škilji - druge

6. POPIS POSLEDIC POTRESA

Pripravljalna dela:
- odstranjevanje ruševin, strojno m³
ročno m³
- podpiranje zidov, stropov z lesom: material m³
All je potreben odklop elektr. inštal. ? DA = NE
- presilažna dimenzija m³
- podpiranje nenosilnih zidov m³
- postavljanje nenosilnih zidov m³
- injektiranje zidov deb. do 50 cm m³
nad 50 cm m³
- lokalno presilažna nosilnih zidov, stropov z zobotinam podpiranjem m³
rušenje in izčistilo preklad na odprt kom
- izdelava hofz. vez. za obzide in etaz. nosilne zidove m³
- odstranitev ometov m³
- nagrova navrh ometov, notranjih zunanjih m³

- popravila poškodovanih stropov: leseni m³
montažni m³
- zamenjava poškodovanih stropov m³
- obnova stropov: leseni m³
opečni m³
- obnova balkonov: leseni m³
montažni m³
- popravila ostrižja m³
- obnova kritine m³
- presilažna kritina m³

- obnova stropov: m³
- nagrova stropov: m³
- nagrova ostrižja: m³
- zamenjava poškodovanih ostrižja: m³
- obnova stropov: m³
- obnova balkonov: m³
- obnova kritine: m³
- presilažna kritina: m³

- obnova stropov: m³
- nagrova stropov: m³
- nagrova ostrižja: m³
- zamenjava poškodovanih ostrižja: m³
- obnova stropov: m³
- obnova balkonov: m³
- obnova kritine: m³
- presilažna kritina: m³

- obnova vgrajene opreme: zidovi betonski kom
kameniti kom
kuhinjska oprema m²
- zaključna dela: obnova stropov: m²
obnova plitkosti del m²
kameniti dela m²
obnova potov m²

- obnova inštalacij: - električna %
- vodovod in kanalizacija %
- centralna %
- telefon %

KATEGORIZACIJA

Kat.	Oznaka	Uporabnost	Opis stanja objekta
1	-	stava vsejiva	različni sistem popljudovan, manjše poškodbe na ostalih delih objekta
2	rumena	stava zahtona	različni sistem lažje popljudovan, poškodbe na ostalih delih objekta, sanacija objekta je ekonomska upravičena
3	rdeča	stava se ruši	rušenje, delna rušenje ali teža poškodbe nosilnega sistema, sanacija ekonomska ni utemeljena

Navodila komisijam:

1. Vsak anketnik mora biti točno izpolnjen v vseh potrebnih rubrikah, razen v primeru objekta 3. kategorije, kjer se t.č. ne izpolnjuje, ampak se obvezno označi na strani 4. listu objekta (Merilni stav.).
2. Za vsak objekt, tudi pri isti hiši številki, je treba izpolniti svoj anketnik.
3. Vsa kodirana okenska pustiti prazna.

Slika 4. Vprašalnik (anketni list) o posledicah potresa 6. maja 1976

vega projekta z vsemi izračuni in načrti je bil dovolj izpolnjen vprašalnik o posledicah potresa z oceno obsega del in materialov, potrebnih za utrditvena dela, ki mu je bila dodana skica s tlorisi in tipičnimi prerezi stavbe z vrisanimi utrditvenimi posegi. Navadno je bila to vgradnja zidnih vezi, zamenjava lesenih stropov z masivnimi, območje injektiranja (ocenjena kubatura) zidov in podobno. Zato so se skupine (komisije) za ocenjevanje uporabnosti stavb okrepile s projektanti statiki in arhitekti, ki so bili usposobljeni, da predpišejo utrditvene ukrepe in ocenijo obseg del, stroške obnove pa ocenijo na podlagi od države predpisanega enotnega cenika. Na podlagi tako pripravljene in potrjene dokumentacije so lastniki hiš dobili za obnovo potrebna finančna sredstva deloma v obliki ugodnega posojila, deloma v obliki nepovratne pomoči. Na hitro so bile pripravljene tudi urbanistične podlage v primerih, ko je bilo treba porušene hiše nadomestiti z novimi, bodisi zidanimi bodisi (predvsem v Breginjskem kotu) lesenimi montažnimi. Obnova je bila z manjšimi izjemami zaključena do zastavljenega roka, seveda pa je bil sam postopek kasneje deležen kritik, ki so letele predvsem na račun urbanističnih rešitev, saj so morale biti odločitve sprejete odločno in hitro, brez dolgotrajnih razprav, in tudi takoj izpeljane, sicer glavni cilj obnove (ne preživeti zime v začasnih bivališčih) ne bi mogel biti dosežen.

V jesenski akciji obnove Posočja je ZRMK nudil strokovno pomoč pri vodenju prenove, pripravil navodila za projektiranje s tipskimi posegi in izvedbenimi detajli ter skrbel za izobraževanje sodelujočih projektantov in tehnikov. Zavodovi strokovnjaki so koordinirali delovanje komisij za popis škode in izdelavo ocen utrditve. Sodelovali so pri reševanju zapletenih primerov, ki so se reševali bodisi na terenu bodisi na rednih koordinacijskih sestankih. Operativne skupine Zavoda so izvajale demonstracije tehničnih ukrepov utrditve na zahtevnejših stavbah, njihovi člani pa delovali tudi kot inštruktorji, ki so usposabljali izvajalce, nevajene specialnih utrditvenih del.

3.2 Dejavnosti v Italiji

Takratna slovenska vlada se je že po majskem potresu odločila priskočiti na pomoč rojakom v Beneški Sloveniji, v po potresu najbolj prizadetih Nadiški in Terski dolini. V okviru pomoči je bil Zavod zadolžen za izobraževanje projektantov – statikov, ki jih je Slovenija poslala na pomoč, da bi pridobili podatke, potrebne za projektiranje obnove, in izdelali vzorčne projekte za utrditev poškodovanih hiš. Zavod je bil tudi zadolžen, da s svojim znanjem in izkušnjami usposobi podjetje Benedil, S.p.a., iz Čedadada, ki ga je vodil slovenski podjetnik in družbeni delavec Dino del Medico in je bilo ustanovljeno predvsem za to, da bi utrjevalo po potresu poškodovane hiše v slovenski lasti. Podjetje je zaposlovalo zamejske Slovence – zidarje, ki so bili pred tem na začasnem delu v Švici. Operativna ekipa Zavoda se je že poleti, po majskem potresu, lotila inštruktorkega dela (slika 5).

Med hišami, ki so jih Zavodovi operativci s podjetjem Benedil utrdili, je bila tudi ena od močno poškodovanih hiš v Bardu (Lusevera), vasi, ki leži na ožjem epicentralnem območju furlanskih potresov. Hišo so Zavodovi strokovnjaki izbrali kot šolski primer za prikaz, da se jo da utrditi, čeprav so jo italijanske oblasti predvidele za rušenje. Groba utrditvena dela na hiši so bila končana pred septembrom, hiša, utrjena s povezovanjem in injektiranjem zidov, pa je septembrski potres podobne intenzitete, kot jo je imel majski, prestala brez poškodb. Ker so bila prenovitvena dela šele v fazi utrjevanja nosilne konstrukcije in je bilo vse ostalo še odprto gradbišče, na prvi pogled ni bilo videti, da je tako. Po zaključeni fazi utrjevanja naj bi se v celoti na novo pozidal močno poškodovani podstrešni del in izdelala nova strešna konstrukcija, zato je bila hiša še brez strehe. Videz hiše tega sicer ne kaže, saj se je med septembrskim potresom poškodoval tudi oder in so se porušile okoliške hiše, vendar natančnejši pregled ni pokazal poškodb na utrjenem in povezanem nosilnem zidovju (slika 6).



Slika 5. Utrditvena dela na hišah v zamejstvu. Levo: polaganje zidnih vezi, desno: injektiranje kamnitega zidovja (foto: E. Vugrinec)



Slika 6. Hiša v Bardu (Lusevera), katere povezano in utrjeno zidovje je septembrska potresa prestalo brez poškodb. Levo: po septembrskem potresu (foto: E. Vugrinec), desno: hiša danes (foto: M. Žerajčič)

Potresa 11. in 15. septembra sta bila eksperiment, izveden v naravi. Še bolj nazorno kot predhodni testi v laboratoriju sta potrdila, da je predlagana metoda utrjevanja enostavnih kamnitih hiš s povezovanjem in z injektiranjem zidov učinkovita in da bi jo zato, ker je enostavna za izvedbo in ne predraga, kazalo uvesti tudi na splošno.

Zavodovi strokovnjaki so svoje izkušnje predstavili širši strokovni javnosti na prizadetem območju v zamejstvu, pri čemer so ključno vlogo pri povezovanju že od vsega začetka odigrali kolegi, slovenski rojaki, člani Inženirske zbornice iz Vidma (Udine). Prav na dan takšnega seminarja/delavnice v Čedadu (Cividale), je udeležence presenetil tudi prvi septembrski potres.

Še bolj kot predavanja o Zavodovih izkušnjah je pozornost italijanske strokovne javnosti vzbudilo obnašanje utrjene hiše v Bardu med septembrskima potresoma. Hiša v Bardu je utrdila zaupanje v predlagane tehnološke rešitve utrjevanja, zato so se italijanski kolegi iz Vidma odločili, da Zavodove strokovnjake pokličejo na pomoč tudi pri širši obnovi prizadetega območja.

Tako prvi prispevek Zavoda v italijanskih uradnih dokumentih najdemo že v publikaciji, ki jo je oktobra 1976 izdalo ministristvo (assessorato) za javna dela avtonomne dežele Furlanije - Julijske krajine [FVC, 1976] in v kateri je prispevek Zavoda tudi posebej omenjen. V slovenskem prevodu se omemba glasi nekako takole:

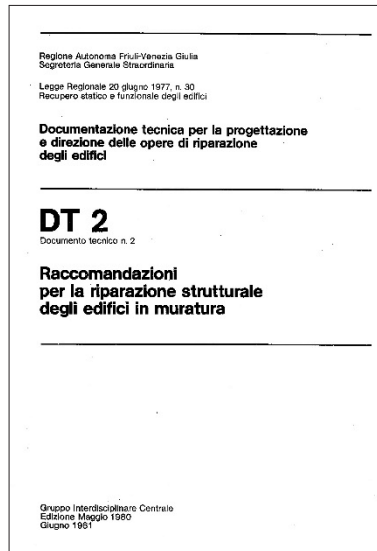
»Publikacija je obogatena z zanimivo dokumentacijo, ki je sad ljubeznivega sodelovanja z Zavodom za raziskavo materiala in konstrukcij iz Ljubljane, katerega tehniki so izvedli vrsto eksperimentov v Terski in Nadiški dolini. Dokumentacija, ki se nanaša na stavbe z bolj enostavno konstrukcijo, bi lahko bila zanimiva za večje število izvajalcev in lastnikov.«

Čeprav je bil Zavod močno vpet v odpravo posledic septembrskih potresov doma, ni zanemaril čezmejnega sodelovanja. Na drugi strani meje je po septembrskem potresu podjetje Benedil začelo uspešno samostojno prenavljati prve hiše. Tudi sodelovanje s kolegi iz Vidma je teklo naprej. Tako je na pobudo slovenskih kolegov iz zamejstva Inženirska zbornica

iz Vidma v začetku leta 1977 za italijanske inženirje in tehnike organizirala dva dobro obiskana seminarja v Vidmu in Pordenonu, na katerih so Zavodovi sodelavci udeležence seznanili z osnovami potresnega inženirstva in dinamike konstrukcij, z računom potresnih sil, načeli varnosti in preverjanja potresne odpornosti zidanih stavb ter z metodami in s tehnološkimi rešitvami utrjevanja. V italijanščino prevedeno učno gradivo je izdal CRAD (Centro di Ricerca Applicata e Documentazione - Center za uporabne raziskave in dokumentacijo) iz Vidma. Kot dokaz, kako pomembno je bilo v danem trenutku gradivo, ki ga je pripravil Zavod, priča dejstvo, da je danes razstavljeno v posebni sobi potresnega muzeja "Tiere Motus" [Tiere Motus, 2026a] v obnovljeni Pušji vasi (Venezona).

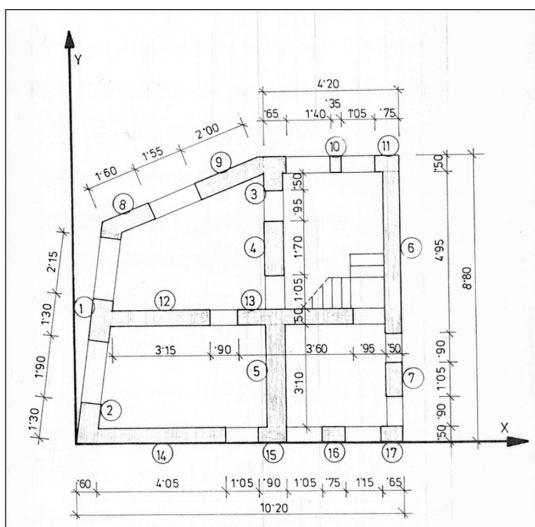
Sodelovanje se je nadaljevalo tudi po ustanovitvi Centralne interdisciplinarne skupine (Gruppo interdisciplinare centrale) s sedežem v Vidmu (Udine), v katero je, da bi Zavodove izkušnje bolj izkoristili, predsednik deželne vlade Furlanije - Julijske krajine imenoval tudi Zavodovega predstavnika. Precejšen del določil ključnega tehničnega dokumenta izmed številnih, ki jih je izdala Centralna skupina, tj. Priporočil za sanacijo konstrukcij stavb, tehniški dokument DT 2 (slika 7, [FVG, 1977]), predstavljajo Zavodove izkušnje. Poleg priporočil in navodil za tehnološko izvedbo ukrepov za utrjevanje so bile iz Zavodove banke podatkov privzete tudi vrednosti mehanskih veličin za zidovje, ki so jih za preverjanje potresne odpornosti potrebovali projektanti.

Dokument DT 2 je za preverjanje potresne odpornosti zidanih stavb predpisal uporabo dveh, na Zavodu razvitih računskih metod. Prva, imenovana metoda **VeT** (v pomenu »**Verifica Taglio**« - preverjanje strižne odpornosti, ali po avtorju, Turnšku, »**Verifica Turnšek**« preverjanje s Turnškovo metodo), je bila metoda, s katero se je odpornost stavb ocenila na podlagi nekaterih ključnih, na enostaven način izračunljivih parametrov. Druga metoda, za katero je v dokumentu v celoti objavljen tudi računalniški program, pa temelji na oceni potresne odpornosti zidane konstrukcije s krivuljo odpornosti kritične etaže [Tomažević, 1978] in je bila ena prvih na svetu, ki je za račun krivulje uporabila metodo, ki se danes imenuje potisna (push-over)



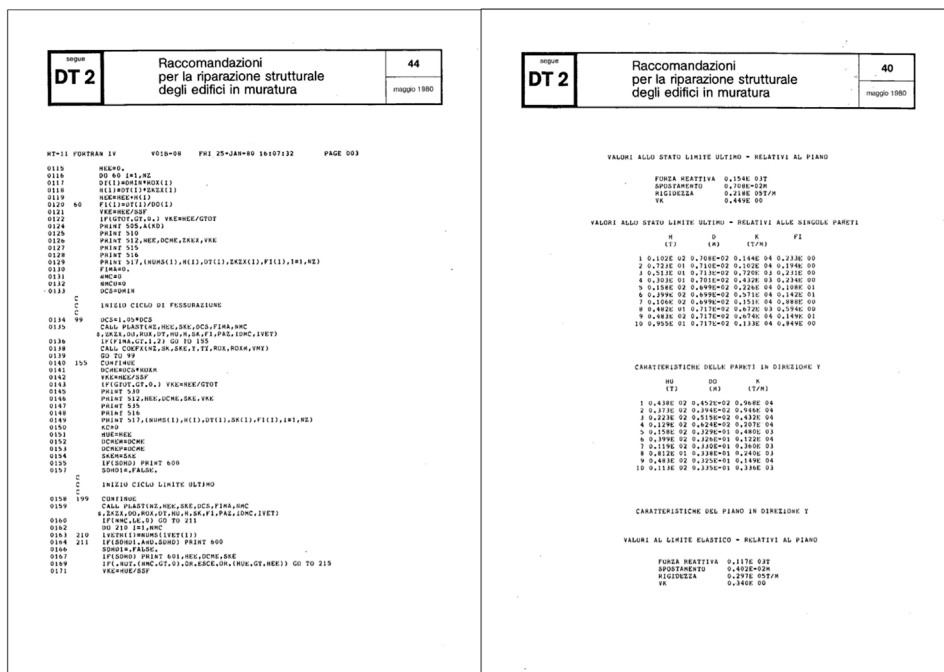
Slika 7. Naslovna stran ene od izdaj Priporočil za sanacijo konstrukcij zidanih stavb. Publikacija je bolj znana pod imenom Tehniški dokument DT 2

metoda. Še posebej velja omeniti, da se krivulja izračuna tako, da se povečujejo vsiljeni pomiki in ne sile, kot je še danes v navadi. Metoda je tipična metoda porušnega mehanizma, zato je bil računalniški program za račun krivulje odpornosti imenovan **POR** (**POR**ušna metoda), po programu pa z istimi kriticami tudi sama metoda. V Italiji se to ime (il metodo **POR**) v različnih verzijah programa še danes uporablja, pri nas pa smo metodo in s tem tudi program v osemdesetih letih prejšnjega stoletja, dopolnjeno in izboljšano, preimenovali v **SREMB** (po angleškem "Seismic **RE**sistance analysis of **M**asonry **B**uildings") z namenom, da bi jo kasneje komercializirali. Kar pa nam, mimogrede, kljub številnim izboljšavam in poskusom, da bi jo naredili projektantom čim bolj prijazno, ni uspelo, tako da nam danes izboljšana metoda služi bolj ali manj za interno uporabo.



2									
HISA	BARDO	1	PRITLICJE PRED SANACIJO						
17	2.47	6000.	1.5						
50	129	90	384	1419	155				
50	129	40	65	1419					
50	80	635	820	1419					
50	170	625	600	1419					
50	210	625	205	1419					
50	495	995	583	1419					
50	105	995	493	1419					
146	50	182	693	1678	150				
183	50	511	821	1729	150				
35	50	823	855	2888	150				
75	50	983	855	1975					
315	50	268	385	1935					
360	50	695	385	2116					
415	50	258	25	1725					
90	50	615	25	1950					
75	50	803	25	2023					
65	50	988	25	1883					
1 - PRITLICJE PO SANACIJI									
17	2.47	10000.	7.0						
PODATKI ZA POSAMEZNE ZIDOVE SO ENAKI!									

Slika 8. Shema zidov za račun potresne odpornosti tipične kamnite hiše (levo) in formular z vhodnimi podatki za računalniško analizo potresne odpornosti (desno)

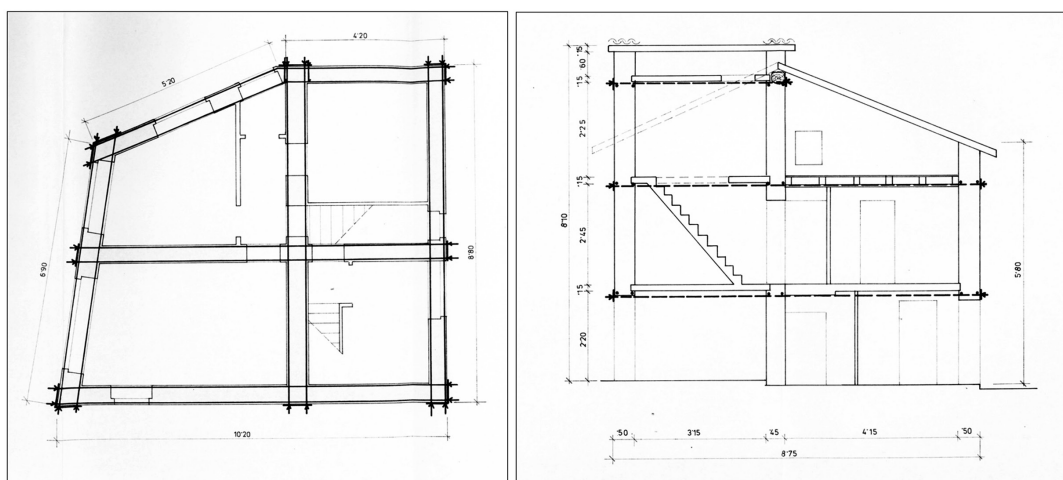


Slika 9. Del programa (levo) in računalniškega izpisa analize potresne odpornosti (desno)

Metoda se je dobro prijela, saj je omogočala dokaj zanesljivo oceno, kolikšna je potresna odpornost hiše v neutrnjenem in utrjenem stanju. Zidana stavba, ki je konstrukcija škatlastega tipa, se razdeli na posamezne zidove, ki pa, povezani z vezmi in s stropno konstrukcijo, delujejo celovito. Računski model obnašanja posameznih zidov vse do porušitve se poenostavi z bilinearno idealizacijo dejanskih, z laboratorijsko preiskavo izmerjenih zakonitosti, privzamejo se pa tudi z ustreznimi preiskavami določene trdnostne in deformabilnostne lastnosti zidovja. Slika 8 na primeru tipične kamnite hiše prikazuje, kako je bilo treba v času, ko je bila metoda prvič uporabljena, pripraviti podatke za račun, slika 9 pa del forttranskega programa (levo) in del rezultatov računa (desno), kot jih je izpisal računalnik. Med utrditvijo so bili v celoti zainjektirani vsi zidovi hiše, kako so bile položene zidne vezi, pa prikazuje slika 10.

4 RAZISKAVE IN SODELOVANJE V PRVIH LETIH PO POTRESU 1976

V letih po potresu je Zavod s financiranjem Raziskovalne skupnosti izvedel obširne raziskave mehanskih lastnosti kamnitega zidovja na vzorcih, sezidanih v laboratoriju iz materiala, odvzega na terenu [Tomažević, 1979]. Zidovi so bili preiskani s ciklično strižno obtežbo v obstoječem in z injektiranjem utrjenem stanju, dobljene vrednosti pa so bile upoštevane v analizi potresne odpornosti poškodovanih stavb. Na podlagi korelacijske med z računom ocenjenim obsegom poškodb in dejanskim, na terenu ugotovljenem stanjem je Zavod tudi ocenil velikost potresnih obremenitev, ki so jim bile izpostavljene analizirane stavbe, in ocene primerjal z vrednostmi, ki jih zahtevajo predpisi.



Slika 10. Razporeditev zidnih vezi v tlorisu (levo) in po višini tipične kamnite hiše (desno)

Zavod je s Centralno interdisciplinarno skupino iz Vidma sodeloval do leta 1981, to je še nekaj časa po potresu, ki je 23. novembra 1980 prizadel pokrajini Irpinijo in Basilicata v južni Italiji. Ker je avtonomna dežela Basilicata "posvojila" tehnični dokument DT 2, je zaradi izkušenj, dobljenih po furlanskem potresu, centralna skupina iz Vidma sodelovala pri izobraževanju tamkajšnjih inženirjev. V okviru izobraževanja je Zavod leta 1981 pripravil dva prispevka za lokalno revijo Politecnico, ki jo je izdajala Inženirska zbornica iz Cosenze, in sodeloval na izobraževalnih seminarjih v Potenzi in Materi spomladi istega leta.

Ker je vmes maja leta 1979 močan potres prizadel tudi nekdanjo jugoslovansko republiko Črno goro, pri odpravi posledic katerega je ravno tako sodeloval ZRMK, je na željo kolegov iz Vidma Zavod organiziral strokovni ogled prizadetega območja v Črni gori, kjer so si videmski kolegi lahko izmenjali izkušnje s Črnogorci.

V letih po potresu 1976 so bili strokovnjaki ZRMK redni vabljeni predavatelji na skoraj vseh strokovnih srečanjih, ki so bila v Italiji posvečena zidanim konstrukcijam, za objavo v italijanskih strokovnih revijah pa so napisali tudi nekaj člankov (npr. [Tomaževič, 1978] in [Terčelj, 1980]). Začelo se je tudi sodelovanje na področju raziskovanja obnašanja zidanih stavb med potresom. Seveda je bilo treba najprej raziskati učinkovitost utrjevanja kamnitega zidovja, tipičnega za kamnite hiše v Furlaniji, z injektiranjem. Čeprav je struktura zidovja načelno podobna tisti na Kozjanskem, za katero je Zavod imel eksperimentalne podatke, ki so bili za današnje pojme morda nekritično privzeti tudi v dokumentu DT 2, je primerjava poškodb na stavbah in rezultatov računskih analiz potresne odpornosti pokazala na neskladja. Hiše, ki bi se po računih morale porušiti, so potres prestale ne preveč resno poškodovane. Ker se s preverjanjem zanesljivosti podatkov, dobljenih po potresu na Kozjanskem, ni dalo počakati do zaključka na začetku poglavja omenjenih raziskav, so italijanski kolegi doma sezidali in z injektiranjem utrdili večje število zidov, ki so bili pripeljani v Ljubljano in preiskani v Zavodovem laboratoriju. Rezultati preiskav so pokazali [ZRMK, 1977], da se pri preverjanju potresne odpornosti z injektiranjem zidovja utrjenih kamnitih hiš lahko upoštevajo precej višje vrednosti strižne (natezne) trdnosti zidovja, kot je bilo prvotno predlagano [Terčelj, 1976]. Preverjanje potresne odpornosti hiš z upoštevanjem na novo dobljenih vrednosti ključnih trdnostnih parametrov kamnitega zidovja je pokazalo solidno ujemanje med na terenu ugotovljenim in z računom predpostavljenim obsegom poškodb.

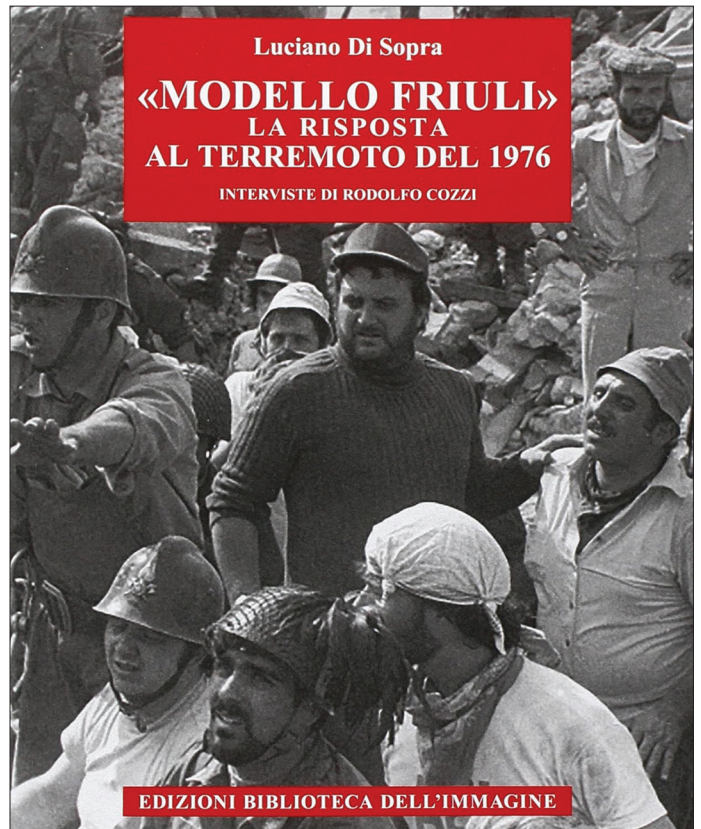
Posebno pomembno je bilo sodelovanje z Univerzo v Padovi in opekarsko industrijo iz Furlanije, ki je padovski univerzi takrat ponudila možnost za postavitev laboratorija za preiskave zidov, pri čemer je Zavod nesebično pomagal z nasveti. Ker so bile preizkuševalne naprave preprostejše kot tiste v Ljubljani, je bil na začetku analiziran tudi vpliv različnih metod preizkušanja na rezultate. To je bilo pomembno, saj je bilo treba po sprejeti metodologiji računa (metoda POR) kot vhodni podatek upoštevati vrednosti mehanskih lastnosti zidovja, ki so dobljene s simulacijo obnašanja zidu med potresom. Ker je bilo kamnito zidovje že preiskano v Ljubljani, je bila primerjalna raziskava izvedena na sodobnem zidovju iz opečnih votlakov, ki so se v tistem obdobju uporabljali za zidanje. Rezultati primerjave na tri različne načine preiskanih zidov so pokazali (del zidov je bil preiskan v Ljubljani), da med rezultati glede

bistvene lastnosti zidovja, tj. strižne oziroma natezne trdnosti, ni pomembnih razlik [Bernardini, 1980]. V obdobju po potresu 1976 je bilo pomembno tudi sodelovanje z milansko Politehniko, katere profesorji so razumeli pomen Zavodovih raziskav in so pripomogli k temu, da so bila Zavodova priporočila dobro v Italiji sprejeta. V tem pogledu je pomemben prispevek članek, objavljen v prvi številki revije Ingegneria sismica [Benedetti, 1984], prve specializirane znanstvene revije, ki je v Italiji začela izhajati na področju potresnega inženirstva.

5 SKLEP

Na eni od predstavitvenih strani razstave v muzeju Tiere Motus v Pušji vasi (Venzone), arhitekturni dediščini mednarodnega pomena, po potresu praktično zravnani z zemljo, ki opisuje prostor, kjer so predstavljene popotresne dejavnosti na področju znanosti in tehnične regulative, je med drugim zapisano [Tiere Motus, 2026b]:

"(V Italiji) je potres še vedno malo poznan pojav, potresno inženirstvo pa še vedno dela prve korake. Ne ve se, kako se med potresom obnašajo stavbe, in ne ve se, kako jih učinkovito narediti potresno odporne. Znanstvena in tehnološka skupnost se šele zbuja. Raziskujejo se materiali in izvajajo se preiskave odpornosti, razvijajo se računski modeli, inženirsko znanje zelo hitro napreduje. Po obdobju več kot 45 let je še danes marsikatera od takrat predlaganih rešitev in tehnologij uporabna in tehnično ustrezna."



Slika 11. Platnice knjige *Modello Friuli*, v kateri avtor predstavi tudi pomen sodelovanja z ZRMK

Če niso prebrali knjige L. Di Sopra: Modello Friuli: La risposta al terremoto del 1976 [Di Sopra, 18] (slika 11), le starejši poznavalci morda vedo, da je bila fotografija, ki predstavlja preiskavo zidu, posneta v Ljubljani, v Ljubljani pa so nastali tudi načrti detajlov zidnih vezi, prikazani na strani, s katere je povzeto zgoraj navedeno besedilo. Obiskovalci muzeja ne izvedo, da so bila tehniška navodila za izvedbo utrditvenih ukrepov v dokumentu DT 2 spisana na podlagi internih priporočil, ki jih je pripravil ZRMK. Na tej isti spletni strani tudi ni zapisano, da so bile pri "prvih korakih" potresnega inženirstva v Italiji zraven tudi izkušnje sosednje Slovenije, ki je najprej priskočila na pomoč rojakom, nato pa vse svoje znanje dala na razpolago sosedom. Zavedajoč se pri tem, da potresi ne poznajo meja in zato meja ne sme poznati niti znanje, kako se obraniti pred njimi. Ne nazadnje se tudi zadnji stavek v citatu nanaša na Ljubljano, saj se principi po potresu uveljavljenih metod utrjevanja zidanih stavb v letih od furlanskega potresa niso spremenili, posodobile so se le nekatere tehnološke rešitve.

Pa morda niti ni treba, da je to posebej zapisano, saj priznanj do danes ni manjkalo: veliko so vredna poznanstva in prijateljstva, ki so se stkala na področju raziskovanja v desetletjih po potresu, se prenesla na mlajše generacije in odprla vrata za sodelova s številnimi univerzami v Italiji. Velja tudi zavedanje, da je slovenska stroka vsaj malo pripomogla k zagonu potresnega inženirstva v Italiji, ki je, pred 50 leti učenec, danes ena od svetovnih velesil na tem področju. Največ je pa vredno spoznanje, da je imelo sodelovanje slovenske stroke pri odpravi posledic furlanskega potresa v zamejstvu velik vpliv na izboljšanje položaja do takrat precej zapostavljene slovenske manjšine, živeče v Beneški Sloveniji.

6 LITERATURA

Benedetti, D., Tomažević, M., Sulla verifica sismica di costruzioni in muratura, *Ingegneria sismica*, 1 (0): 9-16, 1984.

Bernardini, A., Modena, C., Turnšek, V., Vescovi, U., A comparison of three laboratory test methods used to determine the shear resistance of masonry walls, *Proceedings, 7th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol.7, 181-184, 1980.

Boštjančič, J., Pogoji modelne podobnosti pri mehaničnih obremenitvah, *Gradbeni vestnik*, 17 (10), 177-181, 1968.

Boštjančič, J., Sheppard, P., Terčelj, S., Turnšek, V., Use of a modelling approach in the analysis of the effects of repair to earthquake-damaged stone-masonry buildings, *Bolletino di geofisica teorica ed applicata*, Part 2, 19 (72), 1091-1116, 1976.

Čačovič, F., Turnšek, V., Boštjančič, J., Tomažević, M., Droljč, S., Tomšič, J., Modelne preiskave na programirani vibracijski mizi, *Poročilo ZRMK*, Ljubljana, 1970.

Di Sopra, L., Modello Friuli: la risposta al terremoto del 1976, *Biblioteca dell'immagine*, Pordenone, Italija, 2016.

FVG, Esempi di intervento per la riparazione e il rafforzamento antisismico di edifici di abitazione, Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Udine, 1976.

FVG, Raccomandazioni per la riparazione strutturale degli edifici in muratura - DT 2, Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Udine, 1977.

Giorgetti, F., Isoleismal map of the May 6, 1976 Friuli Earthquake, *Bolletino di geofisica teorica ed applicata*, 18 (72), 707-714, 1976.

Terčelj, S., Boštjančič, J., Sheppard, P., Turnšek, V., Seizmična odpornost tipičnih kamnitih zgradb na Kozjanskem, *Poročilo ZRMK 107/75*, Ljubljana, 1976.

Terčelj, S., Turnšek, V., Tomažević, M., Sheppard, P., Le ricerche di laboratorio sui problemi del recupero strutturale dell'edilizia preesistente in zone sismiche, *Ricostruire*, 10/11: 29-34, 1980.

Tiere Motus, pridobljen 10. 4. 2026, iz <https://www.tieremotus.it/>, 2026a.

Tiere Motus, pridobljen 10. 4. 2026, iz <https://www.tieremotus.it/museo/scienza-tecnica-norme/>, 2026b.

Tomažević, M., Computer program POR, Report ZRMK 846, Ljubljana, 1978.

Tomažević, M., Turnšek, V., Il comportamento degli edifici in muratura in zona sismica, *Costruire*, 21 (110), Tst 1-Tst 10, 1979.

Tomažević, M., Turnšek, V., Sheppard, P., Terčelj, S., Analiza potresa v Posočju in sugestije za grajenje : poročilo o raziskovalni nalogi, Ljubljana, Zavod za raziskavo materiala in konstrukcij, TOZD Inštitut za konstrukcije, 1979.

Turnšek, V., Čačovič, F., Some experimental results on the strength of brick masonry walls, *Proceedings, 2nd International Brick-Masonry Conference*, British Ceramic Society, Stoke-on-Trent, 149-156, 1971.

Turnšek, V., Terčelj, S., Razporeditev dinamične horizontalne sile na zidne elemente opečnih zgradb. Simpozijum o primeni savremenih dostignuća u našem građevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija, knjiga 2, ref. 2/13, 1972.

Uradni list SFRJ, Začasni tehnični predpisi za graditev v seizmičnih področjih, št. 39/64, 1964

Uradni list SRS, Odredba o dimenzioniranju in izvedbi gradbenih objektov v potresnih območjih, letnik 20, št.18, Ljubljana, 1963.

Vugrinec, E., Izvedba povezovanja zidov z jeklenimi vezmi v praksi. Rubrika: Informacije ZRMK št. 196-198, *Gradbeni vestnik*, 26 (7/8, 9), 1977.

ZRMK, Poročilo o preiskavi injektiranih kamnitih zidov iz Benečije, poročilo ZRMK, 1977.



dr. Peter Kočman, mag. inž. teh. var.

peter.kocman@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Gradbeništvo in Geodezijo,
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek
UDK/UDC: 519.673.539.3

VPLIV ORIENTACIJE ROBNIH POGOJEV NA VELIKOST UKLONSKIH SIL HOMOGENIH ELASTIČNIH STEBROV

INFLUENCE OF THE END-SUPPORTS ORIENTATION ON MAGNITUDE OF THE BUCKLING LOAD OF HOMOGENEOUS ELASTIC COLUMNS

Povzetek

V članku je predstavljen analitični postopek za določitev velikosti uklonskih sil homogenih elastičnih stebrov. Novost predstavljenega postopka je v tem, da omogoča uklonsko analizo tudi za stebre, ki niso podprti v smereh glavnih vztrajnostnih osi prečnega prereza. Simo-Reissnerjev model prostorskega nosilca je uporabljen kot matematični model stebra. Tako je za določitev velikosti uklonskih sil stebrov poleg upogibnih deformacij upoštevan tudi vpliv osnih in strižnih deformacij. Postopek za določitev velikosti uklonskih sil stebrov pa je zasnovan na izsledkih Kellerja. Ta je dognal, da so kritične točke nelinearnega sistema navadnih diferencialnih enačb identične kritičnim točkam pripadajočega lineariziranega sistema diferencialnih enačb. Ker pa predstavljajo kritične točke Simo-Reissnerjevega matematičnega modela stebra uklonske sile stebra, so s predstavljenim analitičnim postopkom velikosti uklonskih sil elastičnih stebrov točno določene. Uporabnost predstavljenega postopka je v članku predstavljena s parametrično študijo vpliva orientacije robnih pogojev na velikosti uklonskih sil elastičnih homogenih stebrov. Ugotovljeno je bilo, da orientacija robnih pogojev bistveno vpliva na velikosti uklonskih sil stebrov. So pa te vedno večje od dobro znanih Eulerjevih uklonskih sil stebrov.

Ključne besede: uklon stebrov, Simo-Reissnerjev model prostorskih nosilcev, elastičnost

Summary

This article presents an analytical procedure for determining the magnitudes of the buckling loads of homogeneous elastic columns. The novelty of the proposed procedure lies in its ability to perform buckling analysis also for columns with supports not aligned with the principal axes of inertia of the cross-section. The Simo-Reissner spatial beam model is used as the mathematical model of the column. In addition to bending deformations, the influence of axial and shear deformations is therefore also taken into account when determining the buckling loads of the columns. The procedure for determining the buckling loads is based on Keller's findings, which state that the critical points of a nonlinear system of ordinary differential equations are identical those of the corresponding linearized system. Since the critical points of the Simo-Reissner mathematical model correspond to the buckling loads of the column, the presented analytical procedure enables the exact determination of the buckling loads of elastic columns. The applicability of the proposed procedure is demonstrated by a parametric study of how the orientation of boundary conditions affects the magnitudes of the buckling loads of homogeneous elastic columns. It was found that the orientation of the boundary conditions significantly affects the magnitudes of the column buckling loads. However, these loads are always greater than the well-known Euler buckling loads of columns.

Key words: buckling, Simo-Reissner beam model, elasticity

1 UVOD

Stebri so eni najpomembnejših konstrukcijskih elementov gradbenih konstrukcij. Pogosto je porušitev gradbene konstrukcije kot celote posledica izčrpane nosilnosti stebrov. Zato je razumljivo veliko zanimanje strokovnjakov in znanstvenikov za pojave, povezane z nosilnostjo stebrov. Steber lahko doseže svojo nosilnost na dva prevladujoča načina. Pri prvem, ki ga opazimo predvsem pri čokatih stebrih, je nosilnost povezana predvsem z njegovimi materialnimi lastnostmi. Nosilnost steber doseže, ko obremenitev stebra preseže trdnost materiala. Pri drugem načinu pa nosilnost stebra določajo predvsem njegove geometrijske lastnosti. Tovrstni nosilnosti stebrov pogosto pravimo uklonska nosilnost, tlačni sili, ki povzročijo uklon stebra, pa uklonska sila.

Začetek uklonske analize stebrov povezujemo z Eulerjem. Ta je izpeljal eksplicitne izraze za določitev velikosti uklonskih sil stebrov v odvisnosti od tipa robnih pogojev. Zato danes te uklonske sile stebrov imenujemo Eulerjeve uklonske sile. Vendar kasnejši eksperimenti niso v celoti potrdili pravilnosti izrazov za Eulerjeve uklonske sile stebrov. Neskladje med eksperimentalnimi in teoretičnimi rezultati je bila posledica vpliva geometrijskih in materialnih nepopolnosti stebrov in tudi nepopolne centriranosti zunanje točkovne sile. Kljub zahtevnosti je analiza uklonske nosilnosti stebrov dobro razvita (glej na primer [Wang, 2004] ali [Timoshenko, 1961]). Zato jo večina sodobnih pravilnikov za projektiranje gradbenih konstrukcij priporoča za dokaz uklonske nosilnosti stebrov, glej na primer SIST EN 1992-1-1:2005 [SIST, 2005], FprEN 1992-1-1:2022 [CEN, 2022] ali FprCEN/TR 1993-1-102:2026 [CEN, 2026].

Čeprav se zdi, da je uklon stebrov v celoti raziskan, bomo v tem članku pokazali, da to ni res. Neraziskana je ostala analiza uklonske nosilnosti za prostorske stebre, pri katerih je orientacija robnih pogojev stebrov različna od smeri, ki jih določajo glavne vztrajnostne osi prečnega prereza stebrov. V tem članku bomo prikazali nov analitični postopek za določitev velikosti uklonskih sil tovrstnih homogenih elastičnih stebrov. Poleg tega je novost predstavljenega postopka tudi to, da bomo velikosti uklonskih sil stebrov določili tudi z upoštevanjem strižnih deformacij. Zaradi teh novosti bomo izpeljane uklonske sile stebrov imenovali posplošene Eulerjeve uklonske sile.

Članek ima poleg uvoda še tri poglavja. V drugem poglavju predstavimo osnovne enačbe v materialni obliki Simo-Reissnerjevega modela prostorskega nosilca. Nov analitični postopek za določitev velikosti uklonskih sil homogenih elastičnih stebrov predstavimo v tretjem poglavju. S parametrično študijo v četrtem poglavju predstavimo vpliv orientacije robnih pogojev in strižnih deformacij na uklonsko nosilnost stebrov. V zadnjem poglavju v zgoščeni obliki predstavimo bistvene ugotovitve članka.

2 OSNOVNE ENAČBE

Geometrijske spremembe prostorskih elastičnih stebrov in s tem povezano določanje velikosti Eulerjevih uklonskih sil stebrov merimo v točkovnem evklidskem prostoru. Opazovališče inercialnega oziroma globalnega desnosučnega kartezijevega koordinatnega sistema označimo z 0, pripadajoče koordinatne osi z x_1, x_2, x_3 , enotske in med seboj pravokotne in desno orientirane bazne vektorje pa z $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3 = \mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_2$.

Trenutna lega stebra je v Simo-Reissnerjevem modelu določena s težiščno osjo in družino ravnih prečnih prerezov, ki so "pripeti" na težiščno os [Simo, 1985]. Težiščna os stebra je prostorska krivulja, ki jo označimo z $\mathbf{r}_T(x)$, družino prečnih prerezov stebra pa opišemo z vektorjem normale $\mathbf{e}_n(x)$. Parameter težiščne osi x identificiramo s koordinatno osjo x lokalnega krivočrtnega koordinatnega sistema x, y, z . S Simo-Reissnerjevim modelom upoštevamo v analizi tudi strižno deformiranje stebrov, zato vektor normale $\mathbf{e}_n(x)$ ni enak tangentnemu vektorju težiščne osi stebra $\mathbf{e}_x(x)$. Ko označimo lego poljubnega delca prečnega prereza glede na težišče prečnega prereza z vektorjem $\boldsymbol{\rho}(x, y, z)$, je trenutna lega poljubnega delca stebra določena s krajevnim vektorjem

$$\mathbf{r}(x, y, z) = x_1(x, y, z)\mathbf{e}_1 + x_2(x, y, z)\mathbf{e}_2 + x_3(x, y, z)\mathbf{e}_3 = \mathbf{r}_T(x) + \boldsymbol{\rho}(x, y, z) = \mathbf{r}_T(x) + y\mathbf{e}_y(x) + z\mathbf{e}_z(x). \quad (1)$$

V enačbi (1) vektorja \mathbf{e}_y in \mathbf{e}_z ležita v deformirani ravnini prečnega prereza, sta enotska in med seboj pravokotna. Tako skupaj z vektorjem normale $\mathbf{e}_n(x)$ tvorita med seboj pravokotni in desno orientiran triob v točkovnem evklidskem prostoru, torej $\mathbf{e}_z = \mathbf{e}_n \times \mathbf{e}_y$.

V začetni legi je težiščna os opazovanega stebra premica, prečni prerezi pa so nanjo pravokotni. Vektor normale prečnega prereza tudi sedaj označimo z \mathbf{E}_n , sedaj pa je $\mathbf{E}_n = \mathbf{E}_x$, kjer smo z \mathbf{E}_x označili enotski tangentni vektor težiščne osi stebra. Tudi v začetni legi izberemo lokalni koordinatni sistem z x, y, z . Pripadajoče bazne vektorje lokalnega koordinatnega sistema označimo z $\mathbf{E}_x, \mathbf{E}_y$ in $\mathbf{E}_z = \mathbf{E}_x \times \mathbf{E}_y$. Začetno lego poljubnega delca stebra določa krajevni vektor

$$\mathbf{R}(x, y, z) = x_1^0(x, y, z)\mathbf{e}_1 + x_2^0(x, y, z)\mathbf{e}_2 + x_3^0(x, y, z)\mathbf{e}_3 = \mathbf{R}_T(x) + \boldsymbol{\rho}_0(x, y, z) = \mathbf{R}_T(x) + y\mathbf{E}_y + z\mathbf{E}_z, \quad (2)$$

kjer smo z $\boldsymbol{\rho}_0(x, y, z)$, podobno kot v trenutni legi, označili relativno lego poljubnega delca prečnega prereza glede na težišče prečnega prereza, z $\mathbf{R}_T(x)$ pa težiščno os stebra v začetni legi.

Lokalna koordinatna sistema smo v začetni in trenutni legi stebra izbrali tako, da koordinate x, y, z določajo isti delec v začetni in trenutni legi stebra. Brez izgube na splošnosti pa smo izbrali tudi $\mathbf{E}_x = \mathbf{e}_1, \mathbf{E}_y = \mathbf{e}_2, \mathbf{E}_z = \mathbf{e}_3$.

Deformacijsko preslikavo stebra opišemo z vektorjem pomikov težiščne osi

$$\mathbf{u}_T(x) = \mathbf{r}_T(x) - \mathbf{R}_T(x) = u_1(x)\mathbf{e}_1 + u_2(x)\mathbf{e}_2 + u_3(x)\mathbf{e}_3 \quad (3)$$

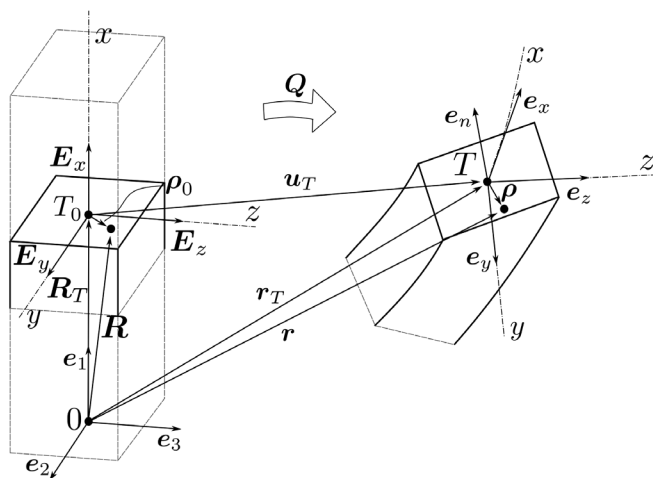
in rotacijskim tenzorjem $\mathbf{Q}(x)$ ($\mathbf{Q}^T \mathbf{Q} = \mathbf{I}, \det \mathbf{Q} = 1$). Rotacijski tenzor preslika bazne vektorje $\mathbf{E}_x, \mathbf{E}_y, \mathbf{E}_z$ s prijemašičem pri $\mathbf{R}_T(x)$ v vektorje $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ s prijemašičem pri $\mathbf{r}_T(x)$, torej $\mathbf{e}_n(x) = \mathbf{Q}(x)\mathbf{E}_n, \mathbf{e}_y(x) = \mathbf{Q}(x)\mathbf{E}_y$ in $\mathbf{e}_z(x) = \mathbf{Q}(x)\mathbf{E}_z$ [Simo, 1985]. S poljem pomikov $\mathbf{u}_T(x)$ in z rotacijskim tenzorjem $\mathbf{Q}(x)$ izrazimo trenutno lego stebra z enačbo (slika 1)

$$\mathbf{r}(x, y, z) = \mathbf{R}_T(x) + \mathbf{u}_T(x) + y\mathbf{Q}(x)\mathbf{E}_y + z\mathbf{Q}(x)\mathbf{E}_z. \quad (4)$$

Ravnotežne, kinematične in konstitucijske enačbe s pripadajočimi robnimi pogoji so za Simo-Reissnerjev model nosilca oziroma stebra dobro znane [Simo, 1985]. Predstavimo jih v materialni obliki in so:

$$x \in (0, L) \quad \boldsymbol{\Gamma}(x) = \mathbf{Q}^T(x)\mathbf{r}'_T(x) - \mathbf{E}_x, \quad (5)$$

$$\tilde{\mathbf{K}}(x) = \mathbf{Q}^T(x)\mathbf{Q}'(x), \quad \tilde{\mathbf{K}}(x)\mathbf{K}(x) = \mathbf{0}, \quad (6)$$



Slika 1. Deformacijska preslikava stebra je določena z vektorjem pomikov $\mathbf{u}_T(x)$ in rotacijskim tenzorjem $\mathbf{Q}(x)$

$$\mathbf{N}'_x(x) + \mathbf{K}(x) \times \mathbf{N}_x(x) + \mathcal{P}(x) = \mathbf{0}, \quad (7)$$

$$\mathbf{M}'_x(x) + \mathbf{K}(x) \times \mathbf{M}_x(x) + (\mathbf{Q}^T(x) \mathbf{r}'_T(x)) \times \mathbf{N}_x(x) + \mathcal{M}(x) = \mathbf{0}, \quad (8)$$

$$\mathbf{N}_x(x) = \mathbb{c}_{\Gamma\Gamma} \boldsymbol{\Gamma}(x), \quad (9)$$

$$\mathbf{M}_x(x) = \mathbb{c}_{\mathbf{K}\mathbf{K}} \mathbf{K}(x), \quad (10)$$

kjer sta materialna operatorja prečnega prereza stebra $\mathbb{c}_{\Gamma\Gamma}$ in $\mathbb{c}_{\mathbf{K}\mathbf{K}}$ določeni z matrikama

$$\mathbb{c}_{\Gamma\Gamma} = \begin{bmatrix} EA_x & 0 & 0 \\ 0 & GA_s & 0 \\ 0 & 0 & GA_s \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbb{c}_{\mathbf{K}\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} GI_x & 0 & 0 \\ 0 & EI_y & EI_{yz} \\ 0 & EI_{yz} & EI_z \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Poudarimo pa, da smo v matriki $\mathbb{c}_{\mathbf{K}\mathbf{K}}$ upoštevali, da v splošnem lokalni koordinati y in z nista glavni vztrajnostni osi prečnega prereza.

V enačbah (5)–(12) označuje L začetno dolžino stebra, $\boldsymbol{\Gamma}$ in $\hat{\mathbf{K}}$ (k poševno simetričnemu tenzorju $\hat{\mathbf{K}}$ smo dualni vektor označili s \mathbf{K}) sta deformacijski meri stebra, \mathbf{N}_x in \mathbf{M}_x sta vektorja notranjih sil in momentov stebra ter \mathcal{P} in \mathcal{M} vektorja zunanje linijske in linijske momentne obtežbe. Skalarne količine v matrikah (11) in (12) predstavljajo dobro poznane materialne in geometrijske karakteristike stebra, in sicer: E in G sta elastični in strižni modul, A_x je ploščina prečnega prereza, A_s je reducirana strižna ploščina prečnega prereza (glej npr. [Timoshenko, 1961] ali [Cowper, 1966]), I_x je polarni vztrajnostni moment, I_{yz} deviacijski vztrajnostni moment, I_y in I_z pa sta vztrajnostna momenta glede na koordinatni osi y in z prečnega prereza stebra.

Sistem posplošenih ravnotežnih enačb stebra, kot enačbe (5)–(12) v nadaljevanju imenujemo, sestavljajo navadne diferencialne in algebrske enačbe. Robne pogoje k diferencialnim enačbam pa sestavljajo tako kinematični kot statični pogoji na robovih stebra. Ti so med seboj vzajemni, torej velja, da tam, kjer so predpisani kinematični robni pogoji, ni statičnih. Robni pogoji stebra v splošni obliki so:

pri $x=0$

$$\mathbf{u}_T(0) = \mathbf{u}_0, \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\varphi}(0) = \boldsymbol{\varphi}_0, \quad (14)$$

$$\mathbf{N}_x(0) - \mathbf{Q}^T(0) \mathbf{F}_0 = \mathbf{0}, \quad (15)$$

$$\mathbf{M}_x(0) - \mathbf{Q}^T(0) \mathbf{M}_0 = \mathbf{0} \quad (16)$$

in pri $x=L$

$$\mathbf{u}_T(L) = \mathbf{u}_L, \quad (17)$$

$$\boldsymbol{\varphi}(L) = \boldsymbol{\varphi}_L, \quad (18)$$

$$\mathbf{N}_x(L) + \mathbf{Q}^T(L) \mathbf{F}_L = \mathbf{0}, \quad (19)$$

$$\mathbf{M}_x(L) + \mathbf{Q}^T(L) \mathbf{M}_L = \mathbf{0}, \quad (20)$$

kjer smo rotacijski tenzor \mathbf{Q} parametrizirali z rotacijskim vektorjem $\boldsymbol{\varphi}(x) = \varphi_1(x) \mathbf{e}_1 + \varphi_2(x) \mathbf{e}_2 + \varphi_3(x) \mathbf{e}_3$. Kot pa je dobro znano, govorimo o uklonu stebra v primeru, ko je steber obtežen le s točkovno silo $\mathbf{F}_L = -F_L \mathbf{e}_1$ pri $x=L$ in če je steber pri $x=L$ pomičen v vzdolžni smeri.

3 POSTOPEK ZA DOLOČITEV VELIKOSTI UKLONSKIH SIL STEBROV

Splošna rešitev posplošenih ravnotežnih enačb (5)–(12) s pripadajočimi robnimi pogoji (13)–(20) ni znana. Zato se zdi, da tudi postopek za določitev točnih vrednosti uklonskih sil stebrov ni mogoč. A kot bomo pokazali v nadaljevanju, je mogoč. Omogočajo nam ga dognanja, ki jih je predstavil Keller [Keller, 1970]. Ta je pokazal, da kritične točke nelinearnega sistema diferencialnih enačb sovpadajo s kritičnimi točkami pripadajočega lineariziranega sistema teh enačb. Kritične točke sistema nelinearnih enačb (5)–(20) pa predstavljajo, kot vemo, v našem primeru uklonske sile elastičnega stebra.

Zaradi večje preglednosti predstavimo postopek reševanja za določitev velikosti uklonskih sil stebrov v dveh sklopih. V prvem sklopu najprej določimo primarno ravnotežno lego stebra in nato osnovni sistem enačb (5)–(20) s pripadajočimi robnimi pogoji okoli te lege lineariziramo. V drugem sklopu prikaznega postopka za določitev velikosti Eulerjevih uklonskih sil stebrov najprej linearizirani sistem diferencialnih in algebrskih enačb rešimo v eksplicitni obliki. To je tudi glavna novost prikazanega analitičnega postopka za določitev velikosti uklonskih sil stebrov. Nato z rešitvami predstavimo še zadnji del postopka za določitev velikosti uklonskih sil elastičnih stebrov. Tu se osredotočimo predvsem na orientacijo robnih pogojev stebrov. Zanimajo nas predvsem stebri z robnimi pogoji, ki niso predpisani v smereh glavnih vztrajnostnih osi prečnega prereza stebrov.

3.1 Primarna ravnotežna lega in linearizacija

Primarna ravnotežna lega stebra je določena z ravno težiščno osjo stebra in homogenim napetostnim in deformacijskim stanjem. Ker je v primarni ravnotežni legi težiščna os stebra ravna, je deformacijska preslikava določena z izrazoma

$$\mathbf{u}_T(x) = u_1(x) \mathbf{e}_1, \quad (21)$$

$$\mathbf{Q}(x) = \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Zaradi homogenega deformacijskega stanja stebra je

$$\Gamma(x) = \varepsilon_x(x)E_x \rightarrow \varepsilon_x = \text{konst.} < 0, \quad (23)$$

$$\mathbf{K}(x) = \mathbf{0}, \quad (24)$$

ter zaradi homogenega napetostnega stanja tudi

$$\mathbf{N}_x(x) = N_x(x)E_x \rightarrow N_x = \text{konst.} < 0, \quad (25)$$

$$\mathbf{M}_x(x) = \mathbf{0}, \quad (26)$$

kjer je $N_x = -F$ in posledično $\varepsilon_x = -F/(EA_x)$. Vse druge fizikalne količine, razen u_1 , so v primarni ravnotežni legi stebra enake nič.

Podroben postopek linearizacije enačb (5)–(12) s pripadajočimi robnimi pogoji (13)–(20) so v primarni ravnotežni legi stebra predstavili Kočman in sodelavci [Kočman, 2024]. Zato v članku le povzamemo linearizirani sistem posplošenih ravnotežnih enačb v primarni ravnotežni legi. Ko prirastke fizikalnih količin izrazimo s simbolom $\delta(\bullet)$, so te določene z enačbami:

kinematične enačbe

$$\delta\varepsilon_x(x) - \delta u_1'(x) = 0, \quad (27)$$

$$\delta\gamma_y(x) + (1 - F/EA_x)\delta\varphi_3(x) - \delta u_2'(x) = 0, \quad (28)$$

$$\delta\gamma_z(x) - (1 - F/EA_x)\delta\varphi_2(x) - \delta u_3'(x) = 0, \quad (29)$$

$$\delta\kappa_x(x) - \delta\varphi_1'(x) = 0, \quad (30)$$

$$\delta\kappa_y(x) - \delta\varphi_2'(x) = 0, \quad (31)$$

$$\delta\kappa_z(x) - \delta\varphi_3'(x) = 0. \quad (32)$$

ravnotežne enačbe

$$\delta N_x'(x) = 0, \quad (33)$$

$$\delta Q_y'(x) - F\delta\kappa_z(x) = 0, \quad (34)$$

$$\delta Q_z'(x) + F\delta\kappa_y(x) = 0, \quad (35)$$

$$\delta M_x'(x) = 0, \quad (36)$$

$$\delta M_y'(x) - F\delta\gamma_z(x) - (1 - F/EA_x)\delta Q_z(x) = 0, \quad (37)$$

$$\delta M_z'(x) + F\delta\gamma_y(x) + (1 - F/EA_x)\delta Q_y(x) = 0. \quad (38)$$

konstitucijske enačbe

$$\delta N_x(x) = EA_x\delta\varepsilon_x(x), \quad (39)$$

$$\delta Q_y(x) = GA_s\delta\gamma_y(x), \quad (40)$$

$$\delta Q_z(x) = GA_s\delta\gamma_z(x), \quad (41)$$

$$\delta M_x(x) = GI_x\delta\kappa_x(x), \quad (42)$$

$$\delta M_y(x) = EI_y\delta\kappa_y(x) + EI_{yz}\delta\kappa_z(x), \quad (43)$$

$$\delta M_z(x) = EI_{yz}\delta\kappa_y(x) + EI_z\delta\kappa_z(x). \quad (44)$$

Linearizirani sistem posplošenih ravnotežnih enačb stebra (27)–(44) sestavlja sistem 18 diferencialnih in algebrskih enačb za prav toliko neznanih fizikalnih količin. Med njimi je dvanajst navadnih diferencialnih enačb prvega reda s konstantnimi koeficienti. Splošna rešitev teh enačb je določena z dvanajstimi konstantami, katere določimo s pomočjo lineariziranih statičnih oziroma kinematičnih robnih pogojev.

3.2 Reševanje linearnega sistema diferencialnih enačb

Reševanje lineariziranih posplošenih ravnotežnih enačb stebra je osrednja novost, ki jo predstavljamo v tem članku. Zato v nadaljevanju to reševanje detajlno predstavimo. Kot rečeno, sestavlja linearizirani posplošeni sistem ravnotežnih enačb dvanajst medsebojno povezanih navadnih diferencialnih enačb prvega reda s konstantnimi koeficienti. Metode za reševanje takšnega sistema enačb so v literaturi dobro znane [Kreyszig, 1972]. Kljub temu pa postopek za določitev rešitve v eksplicitni obliki ni samoumeven. S tem namenom sledimo pristopu, pri katerem povezan sistem diferencialnih enačb prvega reda nadomestimo z nepovezanim sistemom diferencialnih enačb višjega reda.

Ob upoštevanju enačb (27) in (39) zapišemo enačbo (33) v naslednji obliki

$$EA_x\delta u_1'' = 0, \quad (45)$$

podobno z upoštevanjem enačb (30) in (42) zapišemo tudi enačbo (36) v obliki

$$GI_x\delta\varphi_1'' = 0. \quad (46)$$

Kot vidimo, sta diferencialni enačbi drugega reda (45) in (46) med seboj neodvisni in tudi neodvisni od preostalih diferencialnih enačb. V nadaljevanju enačbo (37) preoblikujemo z upoštevanjem enačb (35), (41) in (43). Po kratkem računu dobimo

$$\delta\kappa_y'' + U_y\delta\kappa_z'' + F^a/EI_y\delta\kappa_y = 0, \quad (47)$$

kjer smo zaradi večje preglednosti izraza vpeljali naslednji konstanti

$$U_y = \frac{I_{yz}}{I_y} \quad \text{in} \quad a = \frac{F}{GA_s} + \left(1 - \frac{F}{EA_x}\right). \quad (48)$$

Podobno preoblikujemo s pomočjo enačb (34), (40) in (44) tudi enačbo (38), dobimo:

$$U_z\delta\kappa_y'' + \delta\kappa_z'' + F^a/EI_z\delta\kappa_z = 0. \quad (49)$$

Z uporabo enačb (28), (32), (34), (40) in (47) dobimo eksplicitne zveze med komponento pomika δu_2 in deformacijo $\delta\kappa_z$ oziroma zasukom $\delta\varphi_3$:

$$a\delta\kappa_z = \delta u_2'', \quad (50)$$

$$a\delta\varphi_3 = \delta u_2'. \quad (51)$$

Podobno dobimo tudi z uporabo enačb (29), (31), (35), (41) in (49), eksplicitne zveze med δu_3 in $\delta\kappa_y$ oziroma $\delta\varphi_2$:

$$a\delta\kappa_y = -\delta u_3'', \quad (52)$$

$$a\delta\varphi_2 = \delta u_3'. \quad (53)$$

Ko vstavimo enačbi (50) in (52) v enačbi (47) in (49), dobimo

$$\delta u_3'''' - U_y\delta u_2'''' + k_y^2\delta u_3'' = 0, \quad (54)$$

$$\delta u_2'''' - U_z\delta u_3'''' + k_z^2\delta u_2'' = 0, \quad (55)$$

kjer smo s k_y in k_z označili standardna uklonska koeficienta. Določena sta z enačbama

$$k_y^2 = F^a/EI_y > 0, \quad (56)$$

$$k_z^2 = F^a/EI_z > 0. \quad (57)$$

Diferencialni enačbi (54) in (55) sta še vedno povezani, nepovezani sta le, če je $I_{yz}=0$. Ker pa je naš cilj tvoriti nepovezan sistem diferencialnih enačb tudi v primeru, ko $I_{yz} \neq 0$, moramo postopek ločevanja enačb nadaljevati. Ko enačbi (54) in (55) še dvakrat odvajamo po x , dobimo

$$\delta u_2^{(6)} + c^2 \delta u_2'''' + b^2 \delta u_2'' = 0, \quad (58)$$

$$\delta u_3^{(6)} + c^2 \delta u_3'''' + b^2 \delta u_3'' = 0, \quad (59)$$

kjer smo vpeljali dve novi konstanti

$$c^2 = \frac{(k_y^2 + k_z^2)}{(1 - U_y U_z)}, \quad (60)$$

$$b^2 = \frac{(k_y^2 k_z^2)}{(1 - U_y U_z)}. \quad (61)$$

Ker velja

$$0 < 1 - U_y U_z = \frac{(I_y I_z - I_{yz}^2)}{I_y I_z} \leq 1, \quad (62)$$

sta tudi c^2 in b^2 pozitivni realni števili, kar smo poudarili z zapisom v obliki kvadrata. Enačbi (58) in (59) pa sta že nepovezani.

Tako smo linearizirani sistem posplošenih ravnotežnih enačb (27)–(44) nadomestili z nepovezanim sistemom diferencialnih enačb višjega reda, z enačbami (45), (46), (58) in (59). Enačba (45) določa komponento pomika v vzdolžni smeri stebra, enačba (46) torzijski zasuk stebra. Le enačbi (58) in (59) določata komponenti pomikov stebra, povezanih z upogibom in s tem tudi z uklonom stebra. Zato se v nadaljevanju posvetimo reševanju teh dveh enačb.

Enačbi (58) in (59) sta po obliki popolnoma enaki in sedaj tudi nepovezani. Zato je tudi postopek reševanja obeh enačb popolnoma enak. Ko rešimo eno izmed njiju, poznamo rešitev druge. Eksponentna funkcija e^{px} je rešitev diferencialne enačbe (58) ali (59), če je p ničla karakterističnega polinoma [Kreyszig, 1972]

$$p^6 + c^2 p^4 + b^2 p^2 = p^2(p^4 + c^2 p^2 + b^2) = 0. \quad (63)$$

Prva ničla polinoma (63) je dvakratna, torej $p_1=0$ in $p_2=0$, pripadajoči partikularni rešitvi pa sta $e^{0x}=1$ in $x e^{0x}=x$. Tako smo določitev ničel karakterističnega polinoma prevedli na določitev ničel polinoma četrte stopnje. Njegove ničle pa določimo tako, da polinom četrte stopnje s substitucijo $r=p^2$ prevedemo na polinom druge stopnje. Določitev ničel polinoma drugega reda pa je zelo preprosta. Rešitvi sta:

$$r_{1,2} = \frac{1}{2}(-c^2 \pm \sqrt{D}). \quad (64)$$

Ker velja $0 < (k_y^2 + k_z^2)^2 \leq D$, to pomeni, da $c^4 > c^4 - 4b^2 = D$ in $c^2 > \sqrt{D}$. Posledično sta vrednosti ničel r_1 in r_2 vedno negativni realni števili in preostale štiri ničle karakterističnega polinoma (63) predstavljajo konjugirano kompleksna števila:

$$r_{3,4} = \pm \sqrt{|r_1|} i = \pm s_y i, \quad (65)$$

$$r_{5,6} = \pm \sqrt{|r_2|} i = \pm s_z i. \quad (66)$$

Preostale štiri partikularne rešitve diferencialne enačbe (58) ali pa enačbe (59) so $e^{s_y i x}$, $e^{-s_y i x}$, $e^{s_z i x}$, $e^{-s_z i x}$. Splošna rešitev diferencialne enačbe (58) oziroma (59) je sestavljena iz vsote partikular-

nih rešitev in je izražena s kompleksnimi koeficienti. Ker pa so robni pogoji realni, rešitvi (58)–(59) s pomočjo Eulerjeve formule preoblikujemo v obliko z realnimi koeficienti:

$$\delta u_2(x) = A_z + B_z x + C_z \sin(s_z x) + D_z \cos(s_z x) + E_z \sin(s_y x) + F_z \cos(s_y x), \quad (67)$$

$$\delta u_3(x) = A_y + B_y x + C_y \sin(s_y x) + D_y \cos(s_y x) + E_y \sin(s_z x) + F_y \cos(s_z x), \quad (68)$$

kjer so $A_y, B_y, C_y, D_y, E_y, F_y, A_z, B_z, C_z, D_z, E_z, F_z$ sedaj realne integracijske konstante. Rešitvi (67) in (68) diferencialnih enačb (58) in (59) smo izrazili s štirimi dodatnimi integracijskimi konstantami E_z, F_z, E_y, F_y . Zato za njihovo določitev potrebujemo še štiri dodatne robne pogoje. Te predpišemo na robu stebra pri $x=0$ in so:

$$\delta u_2'''' - U_y \delta u_3'''' + k_z^2 \delta u_2'' = 0, \quad (69)$$

$$\delta u_2^{(5)} - U_z \delta u_3^{(5)} + k_z^2 \delta u_2''' = 0, \quad (70)$$

$$\delta u_3'''' - U_y \delta u_2'''' + k_y^2 \delta u_3'' = 0, \quad (71)$$

$$\delta u_3^{(5)} - U_y \delta u_2^{(5)} + k_y^2 \delta u_3''' = 0. \quad (72)$$

Ko z rešitvama (67) in (68) izrazimo dodatne robne pogoje (69)–(72), dobimo za določitev dodatnih štirih integracijskih konstant sistem štirih algebrskih enačb

$$-U_z s_y^4 D_y - U_z s_z^4 F_y + (s_z^4 - k_z^2 s_z^2) D_z + (s_y^4 - k_y^2 s_y^2) F_z = 0, \quad (73)$$

$$-U_z s_y^4 C_y - U_z s_z^4 E_y + (s_z^5 - k_z^2 s_z^3) C_z + (s_y^5 - k_y^2 s_y^3) E_z = 0, \quad (74)$$

$$-U_y s_y^4 D_z - U_y s_z^4 F_z + (s_y^4 - k_y^2 s_y^2) D_y + (s_z^4 - k_z^2 s_z^2) F_y = 0, \quad (75)$$

$$-U_y s_y^4 C_z - U_y s_z^4 E_z + (s_y^5 - k_y^2 s_y^3) C_y + (s_z^5 - k_z^2 s_z^3) E_y = 0. \quad (76)$$

Te v nadaljevanju izrazimo z osnovnimi integracijskimi konstantami:

$$E_y = \frac{C_y s_y^3 (s_y^2 - k_y^2)(s_y^2 - k_z^2) - C_z k_z^2 (s_y^2 - s_z^2) s_z^3 U_y - C_y s_y^7 U_y U_z}{s_z^3 (k_z^2 - s_y^2)(s_z^2 - k_y^2) + s_y^5 s_z^5 U_y U_z}, \quad (77)$$

$$F_y = \frac{D_y s_2 y (s_y^2 - k_y^2)(s_y^2 - k_z^2) - D_z k_z^2 (s_y^2 - s_z^2) s_z^2 U_y - D_y s_y^6 U_y U_z}{s_z^2 (k_z^2 - s_y^2)(s_z^2 - k_y^2) + s_y^5 s_z^4 U_y U_z}, \quad (78)$$

$$E_z = \frac{C_z s_z^3 (s_z^2 - k_y^2)(s_z^2 - k_z^2) + C_y k_y^2 s_y^3 (s_y^2 - s_z^2) U_z - C_z s_z^7 U_y U_z}{s_y^3 (s_y^2 - k_z^2)(k_y^2 - s_z^2) + s_y^5 s_z^5 U_y U_z}, \quad (79)$$

$$F_z = \frac{D_z s_z^2 (s_z^2 - k_y^2)(s_z^2 - k_z^2) + D_y k_z^2 s_y^2 (s_y^2 - s_z^2) U_z - D_z s_z^6 U_y U_z}{s_y^2 (s_y^2 - k_z^2)(k_y^2 - s_z^2) + s_y^4 s_z^4 U_y U_z}. \quad (80)$$

Ko sta lokalni koordinati y in z glavni vztrajnostni osi prečnega prereza stebra, je $s_y = k_y$, $s_z = k_z$ in $U_y = U_z = 0$. Ker je tudi $E_y = F_y = 0$ in $E_z = F_z = 0$, se rešitvi enačb (58) in (59) poenostavita v znano obliko, to sta dobro znani enačbi za določitev velikosti uklonskih sil standardnih Eulerjevih stebrov

$$\delta u_2(x) = A_z + B_z x + C_z \sin(k_z x) + D_z \cos(k_z x), \quad (81)$$

$$\delta u_3(x) = A_y + B_y x + C_y \sin(k_y x) + D_y \cos(k_y x). \quad (82)$$

Enačbi (81) in (82) sta rešitvi enačb (54) in (55), saj sta že ti zaradi $U_y = U_z = 0$ nepovezani. Predstavljata pa znani uklonski enačbi.

Zadnji del predstavljenega postopka za točno določitev velikosti Eulerjevih uklonskih sil posplošenih Eulerjevih stebrov je enak, kot ga poznamo pri standardnem postopku. Kljub temu pa ga kratko predstavimo. Kot dobro vemo, z izrazom uklon stebra povemo, da ima steber pri isti obtežbi več ravnotežnih leg. Ena med njimi je primarna, t. i. lega z ravno težiščno osjo, preostale pa so upognjene. Ker pa so vse ravnotežne lege stebra določene z enačbama (67) in (68) oziroma (81) in (82), to pomeni, da so različne ravnotežne lege določene z različnimi integracijskimi konstantami. Ker pa te določimo s pomočjo robnih pogojev, torej s pomočjo homogenega sistema linearnih enačb, pretvorimo postopek za določitev velikosti uklonskih sil stebrov na določitev netrivialnih rešitev homogenega sistema linearnih enačb.

Ko neznane integracijske konstante združimo v vektor c in homogen sistem linearnih enačb zapišemo v obliki

$$Kc = 0, \quad (83)$$

so netrivialne rešitve in s tem velikosti uklonskih sil prostorskih stebrov s pogojem

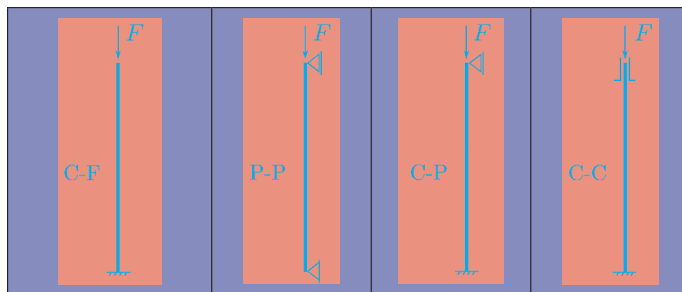
$$\det K = 0. \quad (84)$$

Ko determinanto iz vrednotimo, določajo velikosti uklonskih sil prostorskih stebrov rešitev trigonometrične enačbe. Ta ima neskončno rešitev, najmanjšo med njimi pa imenujemo Eulerjeva uklonska sila stebra. Praviloma trigonometrično enačbo (84) rešimo numerično. Bisekcija ali Newton-Raphsonova iteracijska shema sta primerni izbiri.

4 POSPLOŠENE EULERJEVE UKLONSKE SILE STEBROV

S predstavljenim analitičnim postopkom analiziramo vpliv robnih pogojev na velikosti uklonskih sil elastičnih homogenih stebrov. Težišče analize so stebri, ki so podprti v smereh, ki niso glavne vztrajnostne osi prečnega prereza. Te stebre v nadaljevanju imenujemo posplošeni Eulerjevi stebri, velikosti uklonskih sil teh stebrov pa posplošene Eulerjeve uklonske sile. Kot izhodišče za predstavitev robnih pogojev obravnavanih stebrov izberemo robne pogoje standardnih Eulerjevih stebrov. Te predstavimo v preglednici 1. Označimo jih s C-F, P-P, C-P in C-C, kjer C pomeni vpeto (ang. clamped), F prosto (ang. free) in P členkasto podporo (ang. pinned). Robni pogoji standardnih Eulerjevih stebrov so lahko predpisani le v glavnih vztrajnostnih oseh prečnih prerezov. V preglednici 1 jih prikazujemo za smeri, ki so določene z ravninama z normalama e_2 in e_3 .

Rešitvi diferencialnih enačb (58) in (59) sta enačbi (81) in (82). V teh primerih moramo robne pogoje stebrov izbrati v smereh glavnih vztrajnostnih osi prečnega prereza. Stebri se uklonijo "ravninsko", s tem neodvisno, in v smereh, ki ju določata glavni



Robni pogoji v ravnini z normalo e_2

$\delta u_3(0)=0$	$\delta u_3(0)=0$	$\delta u_3(0)=0$	$\delta u_3(0)=0$
$\delta \varphi_2(0)=0$	$\delta M_y(0)=0$	$\delta \varphi_2(0)=0$	$\delta \varphi_2(0)=0$
$\delta Q_z(L)+F\delta \varphi_2(L)=0$	$\delta u_3(L)=0$	$\delta u_3(L)=0$	$\delta u_3(L)=0$
$\delta M_y(L)=0$	$\delta M_y(L)=0$	$\delta M_y(L)=0$	$\delta \varphi_2(L)=0$

Robni pogoji v ravnini z normalo e_3

$\delta u_2(0)=0$	$\delta u_2(0)=0$	$\delta u_2(0)=0$	$\delta u_2(0)=0$
$\delta \varphi_3(0)=0$	$\delta M_z(0)=0$	$\delta \varphi_3(0)=0$	$\delta \varphi_3(0)=0$
$\delta Q_y(L)-F\delta \varphi_3(L)=0$	$\delta u_2(L)=0$	$\delta u_2(L)=0$	$\delta u_2(L)=0$
$\delta M_z(L)=0$	$\delta M_z(L)=0$	$\delta M_z(L)=0$	$\delta \varphi_3(L)=0$

Preglednica 1. Robni pogoji standardnih Eulerjevih uklonskih stebrov

vztrajnostni osi prečnega prereza. Prvi so točne rešitve za določitev velikosti uklonskih sil elastičnih stebrov z upoštevanjem osnih in strižnih deformacij predstavili Flajs in sodelavci [Flajs, 2003]. Te so:

$$F_{cr,y} + F_{cr,y}^2 \left(\frac{1}{GA_s} - \frac{1}{EA_x} \right) = \frac{\pi^2 EI_y}{L_{u,y}^2}, \quad (85)$$

$$F_{cr,z} + F_{cr,z}^2 \left(\frac{1}{GA_s} - \frac{1}{EA_x} \right) = \frac{\pi^2 EI_z}{L_{u,z}^2}. \quad (86)$$

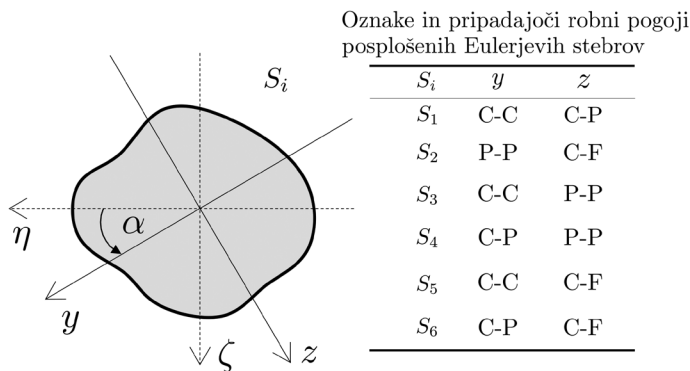
S pomočjo kvadratnih enačb (85) in (86) določimo standardno Eulerjevo uklonsko silo elastičnega homogenega stebra, torej pozitivno in najmanjšo uklonsko silo stebra, z izrazom

$$F_{cr} = \min\{F_{cr,y}, F_{cr,z}\}. \quad (87)$$

V enačbah (85)–(87) smo z L_u označili standardno uklonsko dolžino stebra, razen za steber C-P. Za ta steber moramo L_u določiti posebej. Če zanemarimo strig, je L_u tudi za te stebre enaka splošno znani vrednosti, torej $L_u \approx 0,699L$.

Obravnavajmo sedaj stebre, za katere je rešitev diferencialnih enačb (58) in (59) določena z enačbama (67) in (68). V tem splošnem primeru koordinatni osi y in z nista glavni vztrajnostni osi prečnega prereza, tako tudi robnih pogojev stebrov ne predpisujemo v glavnih smereh. Te stebre označimo s S_i ($i = 1, 2, \dots, 6$), orientacijo pripadajočih robnih pogojev pa prikazujemo na sliki 2.

Na sliki 2 smo z η in ζ označili glavni vztrajnostni osi prečnega prereza stebra, za kot α zavrti koordinatni osi pa y in z . Kot rečeno, te stebre imenujemo posplošeni Eulerjevi stebri, pripadajočo najmanjšo pozitivno vrednost uklonske sile pa posplo-



Oznake in pripadajoči robni pogoji posplošenih Eulerjevih stebrov

S_i	y	z
S_1	C-C	C-P
S_2	P-P	C-F
S_3	C-C	P-P
S_4	C-P	P-P
S_5	C-C	C-F
S_6	C-P	C-F

Slika 2. Oznake in pripadajoči robni pogoji posplošenih Eulerjevih stebrov S_i ($i = 1, 2, \dots, 6$)

šena Eulerjeva uklonska sila stebra, označimo jo z F_{cr} .

Na koncu s parametrično študijo prikažemo še kvantitativni vpliv orientacije robnih pogojev na velikosti posplošenih Eulerjevih uklonskih sil elastičnih stebrov. Obravnavamo stebre z začetno dolžino $L=500$ cm in s pravokotnim prečnim prerezom $a/b=15/10$. Vztrajnostne momente prečnega prereza za koordinatni osi y in z izrazimo z glavnimi vztrajnostmi momenti z enačbami (glej na primer [Stanek, 1989])

$$I_y = \frac{(I_\eta + I_\zeta)}{2} + \frac{(I_\eta - I_\zeta)}{2} \cos 2\alpha + I_{\eta\zeta} \sin 2\alpha = \frac{(I_\eta + I_\zeta)}{2} + \frac{(I_\eta - I_\zeta)}{2} \cos 2\alpha, \quad (88)$$

$$I_z = \frac{(I_\eta + I_\zeta)}{2} - \frac{(I_\eta - I_\zeta)}{2} \cos 2\alpha - I_{\eta\zeta} \sin 2\alpha = \frac{(I_\eta + I_\zeta)}{2} - \frac{(I_\eta - I_\zeta)}{2} \cos 2\alpha, \quad (89)$$

$$I_{yz} = -\frac{(I_\eta - I_\zeta)}{2} \sin 2\alpha + I_{\eta\zeta} \cos 2\alpha = -\frac{(I_\eta - I_\zeta)}{2} \sin 2\alpha. \quad (90)$$

Vsi obravnavani stebri so betonski z modulom elastičnosti $E = 3284$ kN/cm², kar skladno s SIST EN 1992-1-1:2005 [SIST, 2005] ustreza betonu trdnostnega razreda C30/37. Dodatno izberemo

Poissonovo število $\nu = 1/5$ ter strižni modul $G = E/(2 - 2\nu)$. V skladu s priporočili Cowperja [Cowper, 1966] pa je strižni koeficient prečnega prereza določen z izrazom $k_s = 10(1 + \nu) / (12 + 11\nu)$, kar ustreza pravokotnemu prečnemu prerezu.

V preglednici 2 najprej predstavimo velikosti uklonskih sil standardnih Eulerjevih stebrov, in sicer za primer, ko vplive osnih in strižnih deformacij zanemarimo ($\epsilon_x=0, \gamma_y=0, \gamma_z=0$), in za primer, ko jih upoštevamo ($\epsilon_x \neq 0, \gamma_y \neq 0, \gamma_z \neq 0$).

V preglednici 3 prikazujemo vpliv orientacije robnih pogojev na velikosti uklonskih sil posplošenih Eulerjevih stebrov S_i ($i=1,2,\dots,6$). Orientacijo robnih pogojev smo glede na smeri glavnih vztrajnostnih osi prečnih prerezov določili s kotom α . Tudi tu prikazujemo uklonske sile za stebre, ko $\epsilon_x=0, \gamma_y=0, \gamma_z=0$, in stebre, ko $\epsilon_x \neq 0, \gamma_y \neq 0, \gamma_z \neq 0$.

Ko primerjamo velikosti uklonskih sil med standardnimi in posplošenimi Eulerjevimi stebri (primerjava uklonskih sil stebrov v preglednicah 2 in 3), seveda ugotovimo, da so velikosti uklonskih sil za $\alpha=0^\circ$ oziroma za $\alpha=90^\circ$ enake. To smo v preglednici 3 poudarili tako, da smo vrednosti odebelili. S primerjavo tudi ugotovimo, da so velikosti posplošenih Eulerjevih stebrov vedno večje od velikosti standardnih Eulerjevih uklonskih sil. Je pa vpliv robnih pogojev na velikosti uklonskih sil homogenih elastičnih stebrov velik, saj je lahko tudi za dvakrat večji od velikosti uklonskih sil standardnih Eulerjevih stebrov. Glede na povedano lahko povzamemo, da lahko z izbiro robnih pogojev bistveno povečamo uklonsko nosilnost homogenih elastičnih stebrov. Opazimo pa tudi, da je vpliv osnih in strižnih deformacij na velikosti uklonskih sil vseh posplošenih Eulerjevih stebrov zelo majhen in ga za vitke stebre lahko zanemarimo.

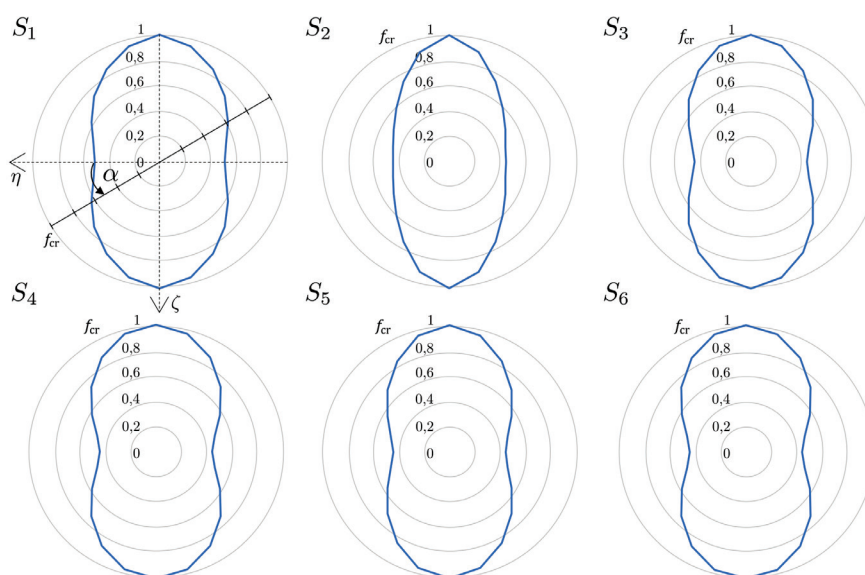
Velikosti uklonskih sil posplošenih Eulerjevih stebrov, ki smo jih predstavili v preglednici 3, prikazujemo še na sliki 3. Tu prikazujemo odvisnost normaliziranih posplošenih Eulerjevih uklonskih sil $f_{cr} = F_{cr} / F_{cr,max}$, kjer $F_{cr,max}$ predstavlja največjo vrednost uklonske sile stebra S_i ($i = 1, 2, \dots, 6$). Takšna grafična predstavitev rezultatov parametrične študije omogoča preglednejši vpogled na vpliv orientacije robnih pogojev na velikost uklonske sile F_{cr} .

F_{cr} (kN)				
Tip podpore:	C-F	P-P	C-P	C-C
$L_{u,i}$:	$2L$	L	$\sim 0,699L^*$	$L/2$
$F_{cr} + F_{cr}^2 \left(\frac{1}{GA_s} - \frac{1}{EA_x} \right) = \frac{\pi^2 EI_{min} (ali I_{maks})}{L_u^2}; (\epsilon_x \neq 0, \gamma_y \neq 0, \gamma_z \neq 0)$				
I_{min}	40,509	161,961	331,122 (331,269)*	646,674
I_{maks}	91,127	364,137	743,879 (744,209)*	1450,669
$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{min} (ali I_{maks})}{L_u^2}; (\epsilon_x = 0, \gamma_y = 0, \gamma_z = 0)$				
I_{min}	40,515	162,059	331,532	648,236
I_{maks}	91,158	364,633	745,946	1458,530

Preglednica 2. Velikosti uklonskih sil Eulerjevih stebrov. Eulerjeva uklonska sila je manjša od obeh vrednosti, v preglednici odebeljena vrednost

F_{cr} (kN)						
α [°]	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
$\varepsilon_x \neq 0, \gamma_y \neq 0, \gamma_z \neq 0$						
0	331,122	40,509	161,961	161,961	40,509	40,509
15	351,006	41,887	173,877	171,641	43,884	43,871
30	402,912	46,240	206,279	197,053	53,108	53,054
45	471,164	54,170	251,569	231,000	65,723	65,626
60	542,937	66,326	301,283	267,961	78,384	78,289
75	609,281	81,707	344,886	304,924	87,703	87,664
90	646,674	91,127	364,137	331,122	91,127	91,127
$\varepsilon_x = 0, \gamma_y = 0, \gamma_z = 0$						
0	331,532	40,515	162,059	162,059	40,515	40,515
15	351,466	41,894	173,989	171,751	43,892	43,878
30	403,518	46,248	206,438	197,198	53,118	53,065
45	471,994	54,181	251,805	231,199	65,739	65,642
60	544,038	66,342	301,622	268,229	78,407	78,312
75	610,668	81,732	345,330	305,272	87,731	87,693
90	648,236	91,158	364,633	331,532	91,158	91,158

Preglednica 3. Posplošene Eulerjeve uklonske sile F_{cr} stebrov S_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) v odvisnosti od kota α (v odvisnosti od orientacije robnih pogojev)



Slika 3. Spreminjanje normiranih velikosti posplošenih uklonskih sil $f_{cr} = F_{cr} / F_{cr, \max}$ stebrov S_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) v odvisnosti od kota α (v odvisnosti od orientacije robnih pogojev)

5 SKLEP

V članku smo predstavili analitični postopek za določitev velikosti uklonskih sil homogenih elastičnih stebrov. Novost predstavljenega postopka je v tem, da omogoča določitev velikosti uklonskih sil tudi za stebre, ki niso podprti v glavnih vztrajnostnih oseh prečnih prereзов. Simo-Reissnerjev model prostorskega nosilca je uporabljen kot matematični model stebra. Zato nam predstavljeni postopek omogoča analizo vpliva tako upogibnih kot osnih in strižnih deformacij na velikosti uklonskih sil. Postopek za določitev velikosti uklonskih sil stebrov smo osnovali na dognanjih Kellerja. Ta je pokazal, da so kritične točke nelinearnega sistema navadnih diferencialnih enačb identične kritičnim točkam pripadajočega lineariziranega sistema enačb. Tako s predstavljenim analitičnim postopkom točno določimo velikosti uklonskih sil homogenih elastičnih stebrov. Uporabnost predstavljenega postopka smo predstavili s parametrično študijo. S študijo smo analizirali vpliv orientacije robnih pogojev in vpliv strižnih deformacij na velikosti uklonskih sil stebrov. Ugotovili smo, da orientacija robnih pogojev bistveno vpliva na velikosti uklonskih sil stebrov. So pa te vrednosti vedno večje od velikosti uklonskih sil standardnih Eulerjevih ravninskih stebrov. To lahko posledično predstavlja možnost za učinkovitejše načrtovanje in optimizacijo stebrov pri prostorskih konstrukcijah, kot so večetažne zgradbe in mostovi. Dodatno pa smo ugotovili, da je vpliv strižnih deformacij na velikosti uklonskih sil zanemarljiv za vitke homogene elastične stebre.

Predstavljeni postopek je primeren predvsem za uklonsko analizo stebrov z masivnimi oziroma polnimi prečnimi prerezi, pri katerih je predpostavka o ravnih prečnih prerezi upravičena. Pri tankostenskih in odprtih prerezi, kot so na primer tankostenski jekleni profili, lahko zaradi vitke izbočitve oziroma distorzije pride do lokalnih deformacij prereza, ki jih Simo-Reissnerjev model ne zajame. V takšnih primerih je zato treba uporabiti naprednejše modele, ki upoštevajo deformacijo oziroma izbočitev prečnega prereza.

6 ZAHVALA

Delo P. Kočmana je financirala Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARiS) v okviru raziskovalnega programa P2-0620. Univerzi v Ljubljani in ARiS se zahvaljujem za podporo. Prav tako se zahvaljujem profesorju Igorju Planincu in profesorju Bojanu Času za koristno diskusijo in priporočila med pripravo članka.

7 LITERATURA

Cowper, G. R., The shear coefficient in Timoshenko beam theory, *Journal of Applied Mechanics*, 33(2), 335–340, 1966.

CEN, FprEN 1992-1-1:2022, Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures, European Committee for Standardization, Brussels, 2022.

CEN, FprCEN/TR 1993-1-102:2026, Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-102: Elastic critical buckling of members, European Committee for Standardization, Brussels, 2026.

Flajs, R., Saje, M., Zakrajšek, M., On the existence and uniqueness of the generalized solution of Reissner's elastica, *Mathematics and Mechanics of Solids*, 8(1), 3–19, 2003.

Keller, H. B., Nonlinear bifurcation, *Journal of Differential Equations*, 7(3), 417–434, 1970.

Kreyszig, E., *Advanced engineering mathematics*, Wiley, 1972.

Kočman, P., Schnabl, S., Planinc, I., On the spatial buckling of elastic columns, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 25(14), 2025.

Simo, J. C., A finite strain beam formulation. The three-dimensional dynamic problem. Part I, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 49, 55–70, 1985.

SIST, SIST EN 1992-1-1:2005, Evrokod 2. Projektiranje betonskih konstrukcij-Del 1-1, Splošna pravila in pravila za stavbe, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2005.

Stanek, M., *Trdnost, Izvlečki iz teorije in rešene naloge*, Ljubljana, 1989.

Timoshenko, S. P., Gere, J. M., *Theory of elastic stability*, 2nd edition., McGraw-Hill, New York, 1961.

Wang, C. M., Wang, C. Y., Reddy, J. N., *Exact solutions for buckling of structural members*, CRC Press, 2004.



doc. dr. techn. Marko Jaušovec, univ. dipl. inž. arh.
marko.jausovec@um.si



asist. Samo Lorber, mag. inž. arh.
samo.lorber@um.si
Univerza v Mariboru.

Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor



Pregledni znanstveni članek
UDK/UDC: 004.8+72

UMETNA INTELIGENCA KOT PARTNER V ARHITEKTURI: PRILOŽNOSTI IN IZZIVI

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AS A PARTNER IN ARCHITECTURE: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES

Povzetek

Članek obravnava umetno inteligenco (UI) kot kognitivnega partnerja v arhitekturnem konceptualnem načrtovanju, pri čemer se osredotoča na predlagani konceptualni okvir 3P (poziv, procesiranje, postprodukcija). Z ilustrativnimi primeri iz praks mednarodno uveljavljenih arhitekturnih birojev preučuje, kako generativna umetna inteligenca pospešuje snovanje idej in podpira kreativne procese v zgodnjih fazah načrtovanja. Članek sistematizira obstoječe znanje o uporabi generativne UI v arhitekturi, predlaga konceptualni okvir za razumevanje sodelovalnega procesa med arhitektom in orodji UI ter identificira izzive, omejitve in etične vidike te integracije. Ugotovitve zagovarjajo prilagodljiv, etično utemeljen pristop, ki izkorišča komplementarne prednosti človeške in strojne inteligence za ustvarjanje inovativnih arhitekturnih rešitev.

Gljučne besede: umetna inteligenca (UI), kognitivni partner, konceptualni okvir 3P (poziv, procesiranje, postprodukcija), generativno načrtovanje, kognitivna razširitev

Summary

This review article explores artificial intelligence (AI) as a cognitive partner in architectural conceptual design, focusing on the proposed 3P conceptual framework (Prompt, Processing, Post-processing). Through illustrative examples from internationally established architectural practices, it examines how generative AI accelerates ideation and supports creative processes in the early stages of design. The article systematizes existing knowledge on the use of generative AI in architecture, proposes a conceptual framework for understanding the collaborative process between architects and AI tools, and identifies the challenges, limitations and ethical aspects of this integration. The findings support an adaptive, ethically grounded approach that draws on the complementary strengths of human and machine intelligence to create innovative architectural solutions.

Key words: Artificial Intelligence (AI), Cognitive Partner, 3P Conceptual Framework (Prompt, Processing, Post-processing), Generative Design, Distributed Cognition

1 UVOD

Umetna inteligenca (UI) hitro spreminja arhitekturno prakso in pospešuje paradigmatški premik od tradicionalnih delovnih postopkov h generativnemu sodelovanju, ki temelji na podatkih. Generativna orodja umetne inteligence, kot so Midjourney, DALL-E in Stable Diffusion, so primer tega prehoda, saj arhitektom omogočajo generiranje konceptov načrtovanja in raziskovanje oblikovalskih alternativ s hitrostjo brez primere [Carrasco, 2024]. Ta razvoj je skladen s teorijo razširjenega uma [Clark, Chalmers, 1998], ki pravi, da kognitivni procesi presega-jo posameznike in zajemajo orodja in sodelovalne sisteme. V arhitekturi UI deluje kot kognitivni partner, ki povečuje človeško ustvarjalnost s porazdeljenimi delovnimi tokovi, ki združuje-jo strojno generirane ideje s človeškim kuriranjem.

Vključevanje umetne inteligence v arhitekturno konceptualno načrtovanje predstavlja metodološko spremembo s širšimi posledicami. Zgodnje delo skupine Architecture Machine Group na MIT, ki jo je v šestdesetih in sedemdesetih letih vodil Nicholas Negroponte, predstavlja eno pomembnih izhodišč za razvoj računalniško podprtega arhitekturnega oblikovanja. Njihovi poskusi vključevanja računalniških procesov v oblikovalsko delo so pomembno vplivali na kasnejši razvoj parametričnih in generativnih pristopov v arhitekturi [Fricker, 2021]. Sodobni pregledi arhitekturnega računalniškega oblikovanja kažejo, da se je z razvojem digitalnih orodij oblikovanje postopoma premaknilo od ročnega modeliranja k parametričnim in generativnim metodam, ki temeljijo na algoritmičnih in pravilih [Caetano, Santos, Leitão, 2020]. Te prakse so pomembno izhodišče za razumevanje sodobnih pristopov, a v zadnjem obdobju vse bolj prihaja v ospredje generativna umetna inteligenca, ki temelji na modelih za pretvorbo besedila v sliko ter besedila v besedilo. Carrasco [2024] to obliko sodelovanja opredeljuje kot kognitivno razbremenjevanje, pri katerem arhitekti ponavljajoče se naloge prenašajo na umetno inteligenco, medtem ko sami ohranjajo strateški nadzor nad procesom. Takšen način dela se uveljavlja tudi v arhitekturnih praksah, kjer generativni modeli omogočajo hitro ustvarjanje vizualnih konceptov in raziskovanje oblikovalskih možnosti. Uporaba generativnih slikovnih modelov v biroju Zaha Hadid Architects (ZHA) kaže, kako lahko inženiring pozivov (angl. prompt engineering) usmerja generiranje rezultatov ter podpira raziskovanje oblikovalskih možnosti v zgodnjih fazah načrtovanja, pri čemer lahko prispeva tudi k ohranjanju prepoznavnih značilnosti oblikovalskega izraza [Hurst, 2023].

Ker se interakcija z generativnimi sistemi vse bolj opira na besedilna navodila, raziskave poudarjajo, da oblikovanje pozivov ni zgolj intuitivna dejavnost, temveč strukturirano področje, pogosto označeno kot arhitektura pozivov (angl. prompt architecture), ki zahteva premišljeno načrtovanje in kritično presojo [Ansara, 2023].

Vključevanje UI odpira tudi pomembna etična in strokovna vprašanja. Sistemi UI pogosto temeljijo na podatkovnih zbirkah, ki so pretežno osredotočene na arhitekturne primere zahodne kulture, zato lahko ponavljajo kulturne pristranskosti in dodatno zapostavljajo regionalne arhitekturne prakse [Foka, 2024].

Sočasno pravne in etične analize poudarjajo, da generativna UI odpira nova vprašanja glede pripisovanja avtorstva in

odgovornosti, saj tradicionalni koncepti avtorstva v kontekstu soustvarjalnih procesov med človekom in algoritmom postajajo vse manj jasni [Mazzi, 2024]. Raziskave s področja arhitekturnega izobraževanja izpostavljajo potrebo po posodobljenih pedagoških okvirih, ki bi prihodnje arhitekte opremili z znanji za delo z generativnimi sistemi [Salazar Rodriguez et al., 2025].

Kljub naraščajočemu zanimanju za uporabo generativne umetne inteligence v arhitekturi v obstoječi literaturi še ni sistematičnega konceptualnega okvira, ki bi celovito opisoval strukturo sodelovalnega procesa med arhitektom in orodji umetne inteligence v fazi konceptualnega načrtovanja.

Cilji tega preglednega članka so: (1) sistematizirati obstoječe znanje o uporabi generativne umetne inteligence v arhitekturnem konceptualnem načrtovanju, (2) na podlagi pregleda literature in ilustrativnih primerov iz prakse predlagati konceptualni okvir 3P (poziv - procesiranje - postprodukcija), ki opisuje ključne faze tega sodelovanja, ter (3) identificirati izzive, omejitve in etične vidike te integracije.

2 METODOLOGIJA

2.1 Pristop pregledne raziskave

Članek je zasnovan kot pregledni znanstveni članek, ki z raziskovalno metodologijo omogoča sistematičen pregled, kritično analizo in sintezo obstoječega znanja na določenem področju [Snyder, 2019]. Obravnavani članek ustreza tipu integrativnega pregleda z elementi konceptualne sinteze, saj poleg pregleda literature razvija tudi izvorni konceptualni okvir. Razvoj konceptualnega okvira sledi pristopu, ki ga opisuje Jabareen [2009], in vključuje identifikacijo ponavljajočih se vzorcev v literaturi ter njihovo sintezo v koherentni konceptualni okvir.

2.2 Strategija iskanja in izbora literature

Pregled literature je bil izveden v bazah podatkov Scopus, Web of Science in Google Scholar. Uporabljeni so bili naslednji iskalni izrazi (v angleškem jeziku): "generative AI architecture (arhitektura generativne umetne inteligence)", "AI architectural design (arhitekturno oblikovanje z umetno inteligenco)", "human-AI collaboration design (oblikovanje s pomočjo sodelovanja med človekom in umetno inteligenco)", "prompt engineering architecture (arhitektura inženiringa pozivov)" in "text-to-image architecture (arhitektura pretvorbe besedila v sliko)". Iskanje je bilo časovno omejeno na obdobje 2018–2025, s poudarkom na virih, objavljenih med letoma 2020 in 2025, v angleškem jeziku.

Kriteriji za vključitev virov v pregled so bili: (a) obravnava uporabe generativne UI v arhitekturnem načrtovanju, (b) obravnava delovnih procesov ali metodologij uporabe UI v arhitekturni praksi ter (c) obravnava teoretičnih okvirov interakcije človek–UI. Kriteriji za izključitev so bili: (a) čisto tehnični članki o algoritmičnih brez arhitekturnega konteksta ter (b) prispevki brez recenzije ali z nepreverljivimi trditvami.

Na podlagi iskanja je bilo identificiranih 380 virov, od katerih je bilo po pregledu naslovov, povzetkov in celotnih besedil v končno analizo vključenih 22 virov. Ta potek identifikacije,

presejanja in vključitve virov v pregled literature prikazuje Preglednica 1. V fazi identifikacije so bili zbrani vsi zadetki iz podatkovnih baz in odstranjeni dvojniki. V fazi presejanja so bili najprej pregledani naslovi in povzetki, v fazi upravičenosti pa celotna besedila glede na vnaprej določene kriterije za vključitev in izključitev, kar je privedlo do končnega števila študij, vključenih v kvalitativno sintezo.

Faza	Opis koraka	Število virov
Identifikacija	Zadetek skupaj v podatkovnih bazah Scopus, Web of Science in Google Scholar	380
	Od tega zadetkov po odstranitvi dvojnikov	368
Presejanje (screening)	Naslovi pregledani glede na tematiko (generativna UI v arhitekturi, človek–UI, delovni procesi)	238
	Povzetki pregledani; izločeni očitno nerelevantni prispevki	91
Upravičenost (eligibility)	Celotna besedila pregledana glede na vključitvene in izključitvene kriterije	64
	Celotna besedila izključena (npr. besedila brez arhitekturnega konteksta, neregistrirana besedila)	42
Vključitev	Študije vključene v kvalitativno sintezo (končno število virov v pregledu)	22

Preglednica 1. Presejalna metodologija upoštevane literature

2.3 Izbor ilustrativnih primerov

Ilustrativni primeri so bili izbrani na podlagi naslednjih kriterijev: (a) mednarodno uveljavljeni arhitekturni biroji, (b) dokumentirana in javno opisana uporaba generativne UI v konceptualnem načrtovanju, (c) raznolikost pristopov (od uporabe standardnih generativnih modelov do prilagojenih algoritmov) ter (d) javno dostopni podatki o delovnem procesu. Izbor primerov sledi tudi pristopom nedavnih raziskav, ki vpliv umetne inteligence v arhitekturi analizirajo skozi prakse mednarodno uveljavljenih arhitektov in birojev kot reprezentativnih primerov transformacije stroke [Avinç et al., 2025].

Izbrani primeri služijo kot ilustrativna podpora konceptualnemu okviru in niso zasnovani kot formalne študije. Prav tako ne sledijo formaliziranemu postopku sistematičnega pregleda literature, temveč dopolnjujejo pregled literature z analizo reprezentativnih praks generativne UI v arhitekturi. Njihov namen je ponazoriti, kako se predlagani konceptualni okvir odraža v raznolikih oblikovalskih praksah, in ne empirično preverjanje okvira.

2.4 Razvoj konceptualnega okvira

Konceptualni okvir 3P je bil razvit po pristopu konceptualne analize, ki ga predlaga Jabareen [2009] in ki sistematično povezuje identifikacijo, razčlenitev in sintezo konceptov iz obstoječe literature. Postopek je potekal v treh korakih.

V prvem koraku smo v vključenih virih prepoznali štiri ponavljajoče se vzorce sodelovanja arhitekta z generativno UI, ki se v literaturi pojavljajo kot opisi delovnih procesov, metod uporabe orodij UI ali teoretični modeli interakcije človek–UI.

Prvi vzorec je arhitektova strukturirana ubeseditvev oblikovalske namere v obliki pozivov. Drugi vzorec predstavlja strojno obdelavo z generativnimi modeli, ki jo izvaja sistem UI. Tretji vzorec zajema kritično kuriranje strojno generiranih rezultatov, ponovno v domeni arhitekta. Četrti, vezivni vzorec pa predstavlja kognitivno porazdelitev med arhitektom in orodjem, ki se prepleta skozi vse tri dejavnosti [Clark, Chalmers, 1998; Carrasco, 2024]. Konkretno ugotovitve iz literature za vsak vzorec povzema Preglednica 2.

Faza okvira 3P	Ključne ugotovitve iz pregledane literature
POZIV (prompt) nosilec: arhitekt	Oblikovanje pozivov kot nova strukturirana arhitekturna veščina, ki zahteva premišljeno načrtovanje in prevod oblikovalske namere v parametrični/besedilni jezik [Ansara, 2023; Bansal, 2024; Pektaş, Sağlam, 2025; Schneider et al., 2025].
PROCESIRANJE (processing) nosilec: sistem UI	Generativna obdelava z orodji UI: avtomatizirano ustvarjanje vizualnih, besedilnih in parametričnih izhodov, ki je lahko omejeno z nepreglednostjo delovanja modelov ter kulturnimi pristranskostmi [Calixto, Croffi, 2024; Foka, 2024].
POSTPRODUKCIJA (postprocessing) nosilec: arhitekt	Kritično vrednotenje in kuriranje strojno generiranih predlogov, izbira, dopolnjevanje in etična presoja rezultatov pred vključitvijo v projekt [Barker, 2023; Hurst, 2023; Mazzi, 2024].
Iterativni cikel – vezivni element vseh treh faz	Sodelovanje človek–UI je inherentno nelinearno: arhitekt na podlagi vrednotenja v postprodukciji oblikuje izpopolnjen poziv za naslednji cikel; cikel se zaključí, ko rezultat zadosti oblikovalskim namenom [Carrasco, 2024; Zhou et al., 2024; Salma et al., 2025].

Preglednica 2. Preslikava ključnih ugotovitev iz pregledane literature v faze konceptualnega okvira 3P

V drugem koraku prepoznani trije vsebinsko ločeni vzorci tvorijo logično sekvenco vhod – obdelava – izhod, ki je značilna za sodelovanje človek–UI v kreativnem oblikovanju [Zhou et

al., 2024; Holter, El-Assady, 2024]. Ti vzorci se v različnih virih sicer pojavljajo v raznoliki terminologiji, vendar jih je mogoče abstrahirati v skupno strukturo delovnega procesa. Sekvenco predlagamo kot tri faze konceptualnega okvira: poziv kot fazo oblikovanja vhodnih podatkov, procesiranje kot fazo strojne obdelave ter postprodukcijo kot fazo vrednotenja in razvoja rezultatov. Pri tem arhitekt prevzema ključno vlogo v prvi in zadnji fazi, medtem ko procesiranje izvaja sistem UI. Poimenovanje 3P je opisno in intuitivno razumljivo ter se ne navezuje na obstoječe okvire s podobnim poimenovanjem v drugih kontekstih.

Tretji korak predstavlja zaprtje cikla. En sam prehod skozi tri faze v praksi praviloma ne zadošča. Iz literature [Barker, 2023; Carrasco, 2024; Zhou et al., 2024; Salma et al., 2025] izhaja, da je oblikovanje z generativno UI iterativen proces. Arhitekt na podlagi vrednotenja v postprodukciji oblikuje izpopolnjen poziv za naslednji cikel in iz cikla izstopi, ko rezultat zadosti oblikovalskemu namenu in tehničnim zahtevam projekta.

V raziskovalnem pristopu so upoštewane omejitve, vključno s hitrim razvojem tehnologije UI, lastniško naravo nekaterih aplikacij UI v arhitekturi in omejenimi dolgoročnimi podatki. Kljub tem omejitvam takšen pristop omogoča konceptualno razumevanje vključevanja UI v arhitekturo ter razvoj okvira, ki lahko usmerja prihodnjo prakso in raziskave na tem področju.

3 KONCEPTUALNI OKVIR 3P

Sinteza vzorcev iz pregledane literature, povzeta v Preglednici 2, kaže, da sodelovanje arhitekta z generativno UI v fazi konceptualnega načrtovanja sledi prepoznavnemu zaporedju treh dejanj: arhitekt ubesedi oblikovalsko namero v poziv (angl. prompt), sistem UI obdelata ta poziv v generativni izhod (angl. processing), arhitekt pa ta izhod kritično ovrednoti in ga bodisi vključi v projekt bodisi vrne v naslednjo iteracijo (angl. post-processing). Te tri dejavnosti opredeljujemo kot tri faze konceptualnega okvira 3P, ki opredeljuje dopolnjujoče se vloge arhitektov in sistemov UI v celotnem procesu konceptualnega načrtovanja.

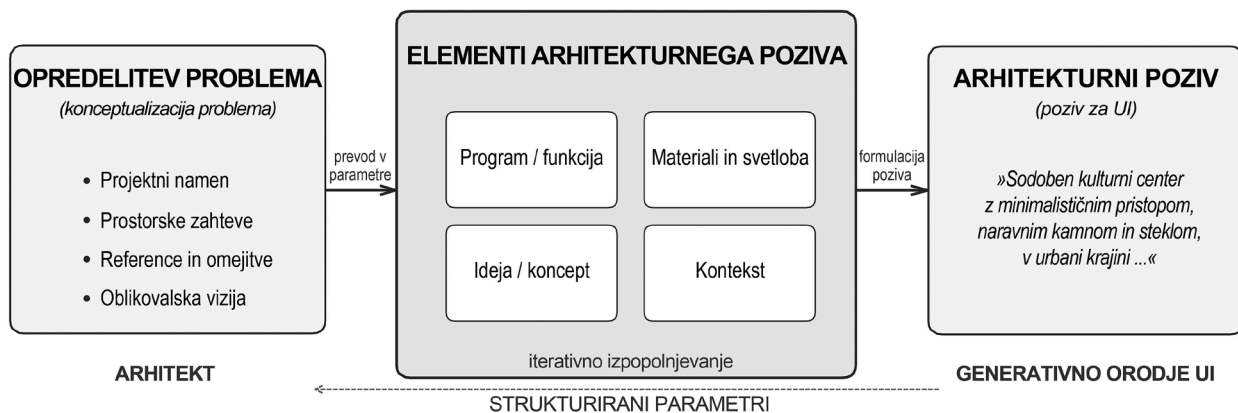
3.1 Poziv (prompt)

Začetna faza se osredotoča na oblikovanje pozivov, ki jih arhitekti posredujejo orodjem UI. Učinkovito oblikovanje pozivov postaja ključna veščina za arhitekta, ki delajo z generativnimi orodji UI, saj zahteva razumevanje arhitekturnih načel in zmožnosti UI [Ansara, 2023; Bansal, 2024]. To vključuje skrbno izražanje projektnih namenov, omejitev, referenc in parametrov v obliki, ki jo UI lahko učinkovito obdelata. Nedavne raziskave kažejo, da oblikovanje pozivov ni zgolj intuitivna dejavnost, temveč strukturirano področje z merljivimi učinki na kakovost rezultatov [Pektaş, Sağlam, 2025]. Pektaş in Sağlam sta tako pokazala, da strukturirano oblikovanje pozivov, ki temelji na analitičnem razčlenjevanju oblikovalskih namenov, bistveno izboljša relevantnost vizualnih rezultatov generativnih modelov v arhitekturi. Schneider, Kilic in Stockhammer [2025] na podlagi eksperimentalne študije s šestimi arhitekti ugotovljajo, da oblikovanje pozivov zahteva posebno obliko arhitekturnega razmišljanja, pri kateri se vizualni in prostorski koncepti prevedejo v besedilne opise, ki usmerjajo generativne sisteme.

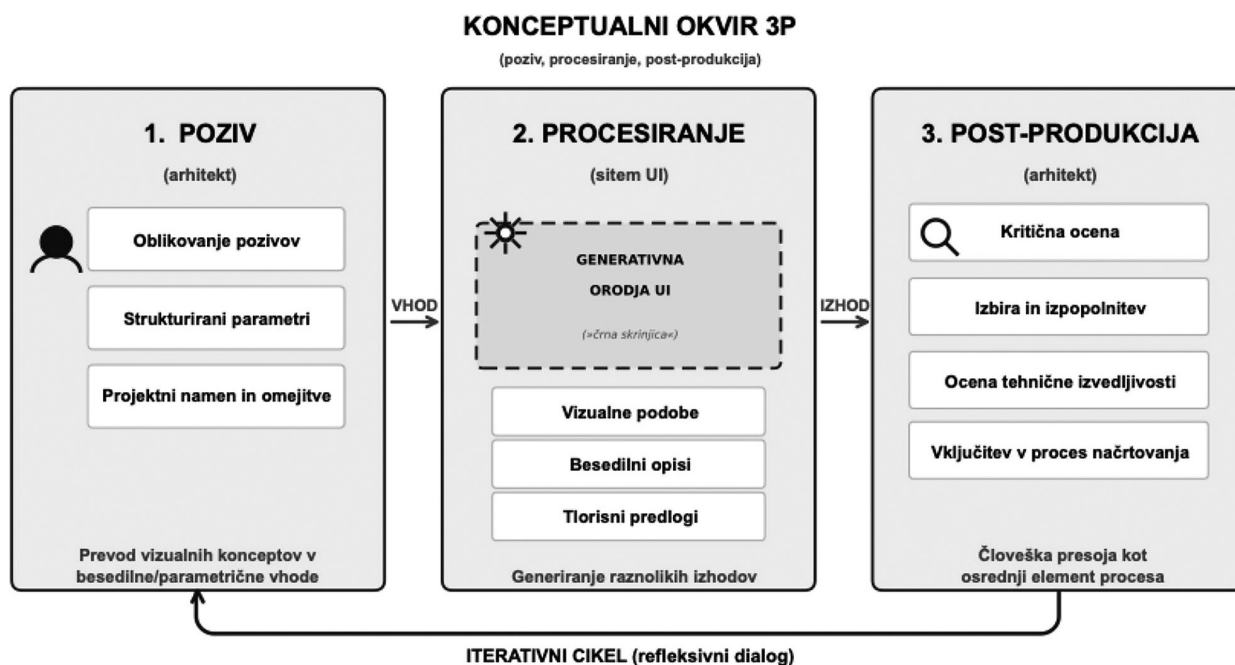
Na podlagi pregleda literature in ugotovitev navedenih raziskav je mogoče arhitekturne pozive strukturirati okoli štirih ključnih elementov: (1) program oziroma prostorska funkcija, (2) ideja oziroma oblikovalski koncept, (3) materiali in svetloba ter (4) kontekst, kot prikazuje Slika 1. Ti elementi odražajo ključne dimenzije arhitekturnega razmišljanja, ki jih je treba prevesti v parametrični jezik generativnih orodij. Faza pozivov tako predstavlja ključni premik v arhitekturnem razmišljanju, saj projektanti oblikovalske namene sistematično preoblikujejo v strukturirane vhodne podatke za sisteme umetne inteligence [Ansara, 2023].

3.2 Procesiranje (processing)

Druga faza konceptualnega okvira 3P vključuje obdelavo arhitekturnih pozivov s strani generativnih orodij UI, ki na podlagi vhodnih podatkov ustvarjajo raznolike oblike izhoda: vizualne podobe (konceptualne skice, prostorske sheme, arhitekturne vizualizacije), besedilne opise, tlorisne predloge ali kombinacije navedenih. Pri tem je treba razlikovati med različnimi vrstami generativnih modelov: jezikovni modeli (npr. GPT, Gemini) generirajo besedilne odgovore, medtem ko slikovno-generativni modeli (npr. DALL E, Midjourney, Stable Diffusion)



Slika 1. Struktura arhitekturnega poziva glede na ključne elemente



Slika 2. Konceptualni okvir 3P (poziv, procesiranje, postprodukcija) kot iterativni cikel sodelovanja med arhitektom in generativnimi orodji umetne inteligence

generirajo vizualne podobe na podlagi pretvorbe besedila v sliko (angl. text to image), nekatera orodja (npr. ChatGPT) pa združujejo oboje v enem vmesniku, kar uporabniku omogoča prehajanje med besedilnimi in vizualnimi izhodi. Faza procesiranja je umeščena v širši konceptualni okvir 3P, ki ga sestavljajo faze poziva, procesiranja in post-produkcije, povezane v iterativni cikel. V tem ciklu arhitekt oblikuje vhodne podatke, sistem UI generira rezultate, arhitekt pa jih kritično ovrednoti ter na tej osnovi oblikuje izboljšane pozive za naslednji krog, kar poudarja iterativno naravo sodelovanja med človekom in umetno inteligenco (Slika 2).

Čeprav obdelava z generativnimi orodji UI za mnoge arhitekta ostaja nepregledna, pogosto jo opisujejo kot »črna skrinjica« (angl. black box), splošno razumevanje načel delovanja uporabnikom pomaga predvideti omejitve ali nepričakovane rezultate. Calixto in Croffi [2024] opozarjata, da uporabniku prijazna generativna orodja UI v arhitekturi ustvarjajo gnezdeno črne skrinjice, ki zakrivajo logične procese računalniškega oblikovalskega razmišljanja in s tem omejujejo oblikovalčovo zmožnost razumevanja in nadzora nad generativnim postopkom. Tovrstna nepreglednost ima tudi neposredne posledice za kakovost rezultatov, saj lahko v njihove rezultate vnaša kulturne pristranskosti [Foka, 2024].

Kljub tej nepreglednosti pa faza procesiranja ni zgolj pasivno čakanje na rezultate, temveč predstavlja ključno točko v iterativnem dialogu med arhitektom in sistemom UI. Zhou et al. [2024] ugotavljajo, da je kreativno oblikovanje nelinearen proces, v katerem oblikovalci razvijajo ideje skozi iterativno preoblikovanje, medtem ko orodja UI pogosto sledijo linearni sekvenci navodil. Avtorji zato predlagajo okvir nelinearnega sodelovanja, ki bolje odraža ustvarjalne prakse in spodbuja premik v razumevanju UI od izvajalca navodil k soustvarjalnemu partnerju. Podobno Salma, Hijón-Neira in Pizarro [2025]

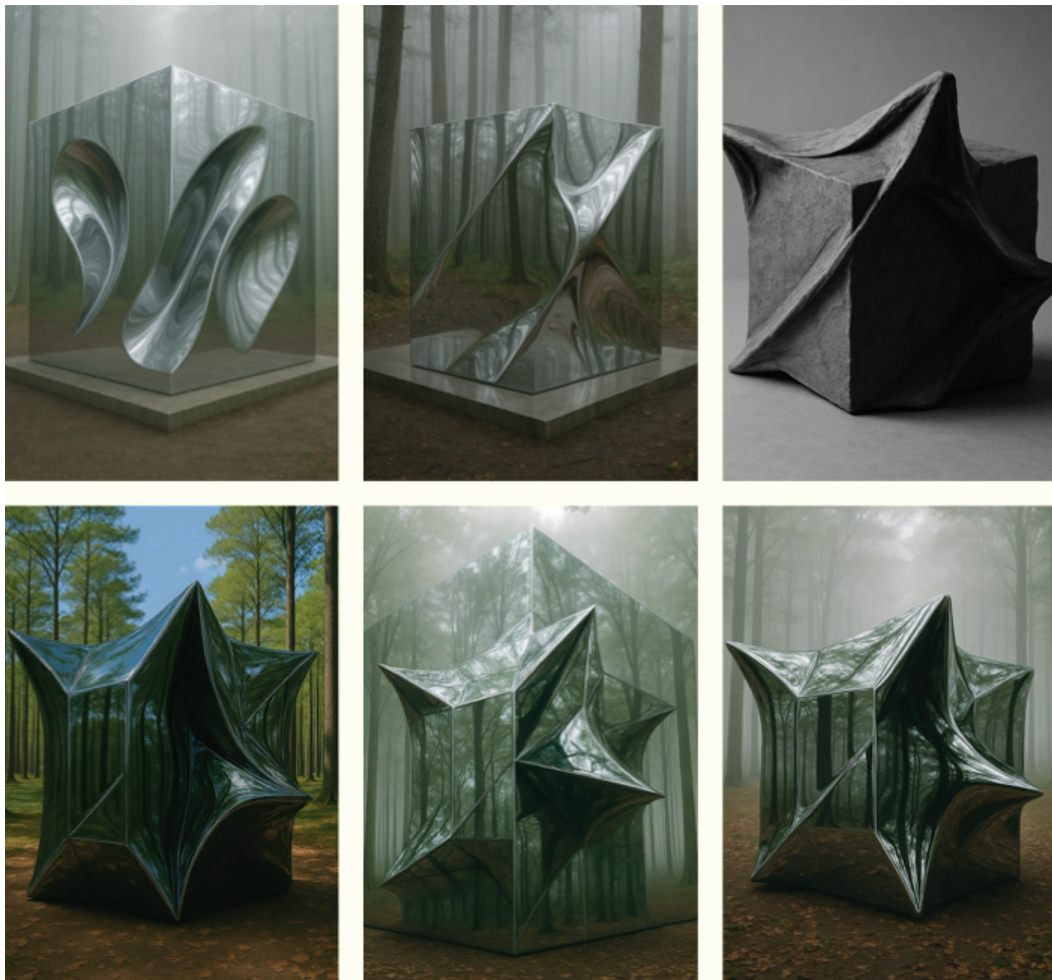
opisujejo sodelovanje med človekom in umetno inteligenco kot preplet nasprotij, kot so dvoumnost in natančnost, nadzor in naključje, hitrost in refleksija, posameznik in kolektiv ter izvirnost in preoblikovanje obstoječih rešitev. Ti vidiki ne predstavljajo problemov, temveč pomembna izhodišča, ki lahko usmerjajo razvoj novih soustvarjalnih pristopov.

Ta faza tako poudarja komplementarno naravo človeške in umetne inteligence: čeprav lahko UI hitro ustvari številne možnosti načrtovanja, ji manjka kontekstualno razumevanje, kulturna zavest in etična presoja, ki jih v proces načrtovanja prispeva človeški faktor, kar Holter in El-Assady [2024] utemeljujeta s konceptualnim modelom sodelovanja človek-UI, ki temelji na treh dimenzijah, osrednje in odločevalske vloge človeka, interakcije in prilagajanja ter poudarja potrebo po jasni razdelitvi kognitivnih vlog med človeka in sistem UI.

3.3 Postprodukcija (post-processing)

Zadnja faza vključuje arhitektovo kritično oceno, izbiro in izpolnitev rezultatov, ki jih ustvari UI. Ta faza poudarja osrednjo vlogo človeške presoje v procesu načrtovanja, saj arhitekti ocenjujejo kakovost, izvedljivost in ustreznost predlogov UI. Dejavnosti postprodukcije vključujejo izbiro obetavnih konceptov načrtovanja med več alternativami, ki jih je ustvarila UI, oceno tehnične izvedljivosti, izpolnitev rezultatov UI in vključitev v širši postopek načrtovanja. Pri tem morajo arhitekti ohraniti kritično perspektivo in se zavedati, da so lahko rezultati, ki jih generira UI, vizualno prepričljivi, vendar tehnično nepraktični ali kontekstualno neustrezni.

Proces postprodukcije lahko ponazorimo tudi na primerih iz pedagoške prakse, kjer študenti z uporabo generativnih orodij UI razvijajo oblikovalske koncepte skozi iterativno selekcijo in transformacijo rezultatov. Takšni primeri kažejo, da arhitekt oziroma



Slika 3. Primer razvoja arhitekturne ideje z uporabo generativne umetne inteligence, ki ponazarja iterativni proces selekcije in izpopolnjevanja predlogov v fazi postprodukcije (vir: Viktorija Jakimovska, študentsko delo, UM, FGPA, predmet: AI v arhitekturi, mentor: doc. dr. techn. Marko Jaušovec)

oblikovalec ne prevzema vloge pasivnega uporabnika, temveč aktivno kurira, interpretira in usmerja razvoj ideje skozi zaporedne iteracije. Primer takšnega procesa prikazuje razvoj ideje za paviljon v naravnem okolju, kjer so z uporabo strukturiranega poziva (kontekst-material-forma-atmosfera) generirane različice zasnove, ki jih oblikovalec postopoma izbira, vrednoti in izpopolnjuje. Proces poudarja fazo postprodukcije kot ključno točko odločanja in transformacije generiranih predlogov (Slika 3).

Takšni primeri dodatno potrjujejo, da postprodukcija ni zaključna faza, temveč prehodna točka v nadaljnje iteracije procesa. Ponavljajoča se struktura konceptualnega okvira 3P je še posebno očitna v tej fazi, saj izbrani rezultati pogosto postanejo vhodni podatki za naslednje cikle obdelave pozivov, kar ustvarja dialog med arhitektom in UI, ki postopoma izpopolnjuje projektno rešitev [Holter, El-Assady, 2024]. Konceptualni okvir 3P pojmuje sodelovanje med človekom in sistemom UI kot ponavljajoči se dialog in ne kot linearni proces. Med razvojem zasnove arhitekti prehajajo skozi več iteracij pozivov, procesiranja in postprodukcije, pri čemer vsak cikel temelji na spoznanjih iz prejšnjih iteracij.

Kljub iterativni naravi procesa pa arhitekt ohranja odločilno vlogo pri določitvi trenutka, ko se krog interakcij zaključi. Arhitekt iz iterativnega cikla izstopi, ko rezultat zadosti oblikovalskim namenom in tehničnim zahtevam projekta, to pomeni, ko izbrana rešitev doseže zadostno raven konceptualne jasnosti, prostorske koherence in skladnosti s projektnimi zahtevami ter omogoča prehod v nadaljnje faze načrtovanja.

Ta interakcija je skladna s teorijo kognitivne razširitve [Clark, Chalmers, 1998], saj v tem pogledu UI ne deluje kot avtonomni oblikovalec, temveč kot razširitev kognitivnih zmožnosti arhitekta. Patrik Schumacher iz biroja Zaha Hadid Architects ta postopek opisuje kot »vizualni pingpong«, pri katerem arhitekt vnese besedilni opis, UI ustvari več različic, človeška ekipa izbere obetavne smeri, cikel pa se ponavlja, dokler se ne oblikuje zadovoljiva projektna rešitev [Barker, 2023]. Konceptualni okvir 3P tako zagotavlja okvir za razumevanje UI ne kot nadomestka za arhitekturno strokovno znanje, temveč kot partnerja v kognitivnem ekosistemu, v katerem so človeška ustvarjalnost, presoja in vrednote osrednjega pomena.

4 ILUSTRATIVNI PRIMERI IZ ARHITEKTURNE PRAKSE

4.1 Zaha Hadid Architects (ZHA)

Arhitekturni biro Zaha Hadid Architects (ZHA) je pod vodstvom Patrika Schumacherja postal pomemben zagovornik vključevanja umetne inteligence v arhitekturno oblikovanje. ZHA uporablja slikovnogenerativne modele, kot sta DALL-E in Midjourney, za razvoj oblikovalskih zamisli, zlasti za natečaje in zgodnje snovanje idej [Barker, 2023]. Za pristop biroja je značilna slogovna kontinuiteta, saj arhitekti z oblikovanjem pozivov, ki vključujejo ključne oblikovalske reference, ohranjajo prepoznavno parametrično estetiko biroja. UI se večinoma uporablja v konceptualnih in natečajnih fazah, kjer hitro ustvarjanje več alternativnih zasnov zagotavlja konkurenčno prednost, pri čemer generativni slikovni modeli služijo kot vizualno raziskovalno orodje za razvoj in presojo oblikovalskih konceptov v praksi [Parametric Architecture, 2024]. Schumacher je izjavil, da uporaba UI pomaga pri »pridobivanju dela in osvajanju naročil« ter predstavlja »izjemno okrepitev« sposobnostim podjetja. Arhitekti biroja ZHA za nadaljnji razvoj izberejo le manjši delež rezultatov, približno 10-15 %, kar potrjuje ključno vlogo človeške presoje v fazi postprodukcije konceptualnega okvira 3P. Biro je ustanovil notranjo raziskovalno skupino za UI, namenjeno razvoju bolj specializiranih arhitekturnih aplikacij.

V kontekstu predlaganega konceptualnega okvira 3P se praksa ZHA najpogosteje osredotoča na fazi poziva in postprodukcije. Arhitekti skrbno oblikujejo besedilne pozive, ki vključujejo slogovne reference biroja (parametrična estetika, fluidne organske oblike), fazo procesiranja pa prepūščajo standardnim generativnim modelom. V fazi postprodukcije je ključna rigorozna selekcija, saj se za nadaljnji razvoj izbere le manjši delež generiranih rezultatov. To ponazarja, da okvir 3P ni nujno simetričen, pri ZHA je težišče na človeški kontroli vhoda in izhoda, medtem ko je strojna obdelava relativno standardizirana.

4.2 MVRDV

Nizozemski arhitekturni biro MVRDV je umetno inteligenco vključil v svojo metodologijo oblikovanja, ki temelji na raziskavah, v okviru oddelka MVRDV NEXT. Pristop MVRDV poudarja UI kot sodelovalno raziskovalno orodje, ki izboljšuje podatkovno podprte postopke oblikovanja. Biro uporablja generativne modele za brainstorming in konceptualizacijo, pri čemer na podlagi konceptualnih skic ali ključnih besed ustvarja začetne vizualne zamisli kot izhodišča za skupinske razprave [Rubio, 2024]. Ta pristop spodbuja kreativni proces in omogoča raziskovanje novih kombinacij oblik, materialov in prostorskih rešitev, saj UI deluje kot orodje za razširjanje oblikovalskih možnosti [MVRDV, 2024].

Pri urbanih projektih MVRDV uporablja generativno UI za ustvarjanje več različic prostorskih zasnov na podlagi parametrov, kot so omejitve višine in razmerja parcel, kar omogoča vzporedno raziskovanje več smeri oblikovanja v skrajšanih časovnih okvirih. Biro si odnos med arhitektom in UI predstavlja kot ponavljajoči se dialog, podoben sodelovanju z mlajšim oblikovalcem, vendar z bistveno hitrejšo odzivnostjo. Gene-

rativna orodja UI pomagajo tudi pri ustvarjanju visokokakovostnih vizualizacij, diagramov in animacij za interni razvoj in predstavitev strankam [Hurst, 2023].

V kontekstu okvira 3P MVRDV kaže bolj uravnoteženo porazdelitev aktivnosti med vsemi tremi fazami. V fazi poziva biro uporablja tako besedilne kot vizualne vhodne podatke (konceptualne skice, ključne besede), v fazi procesiranja izkorišča parametrične generativne možnosti za urbano načrtovanje, v fazi postprodukcije pa rezultate vrednoti v kontekstu podatkovnih analiz. Ta primer ponazarja uporabo okvira 3P v podatkovno usmerjeni praksi, kjer UI ni le vizualno orodje, temveč tudi raziskovalni instrument.

4.3 Studio Tim Fu

Studio Tim Fu, ki ga je ustanovil nekdanji arhitekt biroja Zaha Hadid Architects, je primer celovitega vključevanja UI v vse faze posameznega projekta. Posestvo ob Blejskem jezeru v Sloveniji je pogosto predstavljeno kot eden prvih arhitekturnih projektov v svetovnem obsegu, pri katerem je UI pomembno usmerjala celoten proces načrtovanja [PA Academy, 2024]. Studio se pri projektu opira na referenčne podatke iz arhitekturnega opusa Jožeta Plečnika in lokalnega konteksta, pri čemer umetna inteligenca pomaga prepoznavati in reinterpretirati značilne oblikovne elemente v sodobnem kontekstu ter analizira okoljske in prostorske podatke, vključno z značilnostmi lokacije, kar omogoča boljšo prilagoditev zasnove lokalnemu kontekstu in trajnostnim ciljem [Stathaki, 2025].

Z uporabo UI je ekipa razvijala več variant zasnove ter hitro iterirala med različnimi prostorskimi možnostmi. Takšen pristop podpira oblikovalski proces, v katerem UI deluje kot sodelovalno orodje za generiranje, analizo in vrednotenje predlogov. Tim Fu poudarja, da umetna inteligenca ne nadomešča arhitekta, temveč razširja njegove ustvarjalne zmožnosti in omogoča bolj dinamičen ter iterativen razvoj projektnih rešitev [Stathaki, 2025].

Tim Fu opisuje proces kot iterativno izpopolnjevanje predlogov, ki jih generira UI in se skozi stalne prilagoditve razvijajo v dialogu med arhitektom in algoritmom [PA Academy, 2024]. Pri projektu so uporabljeni generativni modeli, ki se opirajo na izbrane referenčne primere, kar omogoča vključevanje lokalnega kulturnega konteksta v oblikovalski proces. Na ta način UI ne deluje zgolj kot orodje za generiranje oblik, temveč kot sistem, ki podpira interpretacijo zgodovinskih referenc in njihovo transformacijo v sodobne arhitekturne izraze [Stathaki, 2025].

Studio Tim Fu predstavlja najcelovitejšo uporabo okvira 3P izmed obravnavanih primerov. V fazi poziva studio vnaša lokalni kulturni kontekst, v fazi procesiranja pa uporablja napredne generativne pristope, ki omogočajo raziskovanje širšega spektra oblikovalskih možnosti. V fazi postprodukcije rezultate vrednoti skozi prizmo kulturne dediščine, okolja in trajnostnih meril. Ta primer kaže, da je okvir 3P dovolj prilagodljiv, da zajame preproste delovne procese, kot je standardna pretvorba besedila v sliko, kot tudi kompleksnejše pristope, ki temeljijo na vključevanju specifičnih podatkov in kontekstualnih informacij v proces načrtovanja.

4.4 Primerjalna sinteza primerov

Primerjalna analiza obravnavanih primerov razkriva različne modele integracije generativne UI v arhitekturno prakso (Preglednica 3). Čeprav vsi trije biroji uporabljajo UI predvsem v zgodnjih fazah načrtovanja, se razlikujejo v stopnji tehnološke integracije in vlogi umetne inteligence v oblikovalskem procesu. Pri ZHA UI deluje predvsem kot orodje za hitro generiranje konceptov ob ohranjanju prepoznavnega slogovnega izraza, medtem ko MVRDV umetno inteligenco vključuje kot raziskovalni instrument v podatkovno usmerjenem oblikovanju. Studio Tim Fu pa predstavlja najbolj celostno integracijo, kjer UI deluje kot soustvarjalni partner, ki združuje generativne metode z lokalnim kulturnim kontekstom.

Ključna razlika med primeri se kaže predvsem v fazi procesiranja: pri ZHA je ta faza relativno standardizirana, pri MVRDV razširjena s parametričnimi pristopi, pri Studiu Tim Fu pa nadgrajena z vključevanjem specifičnih podatkov in kontekstualnih informacij. Preglednica 3 dodatno pokaže, da se primeri razlikujejo predvsem v vlogi UI in stopnji njene integracije v oblikovalski proces, pri čemer pa v vseh primerih ostaja ključna vloga arhitekta pri usmerjanju in kritičnem vrednotenju rezultatov. Kljub tem razlikam vsi primeri potrjujejo, da UI ne nadomešča arhitekta, temveč preoblikuje njegovo vlogo v smeri usmerjanja, interpretacije in kritičnega vrednotenja oblikovalskega procesa.

Teoretično razumevanje te preobrazbe je mogoče uokviriti s teorijo kognitivne razširitve. Koncept razširjenega uma, ki sta ga razvila Clark in Chalmers [1998], predvideva, da se človeški um z interakcijo z orodji in tehnologijami širi v zunanji svet. V tem pogledu lahko sisteme UI razumemo kot razširitve arhitekturne kognicije in ne kot ločene entitete. V arhitekturni praksi se kognitivna razširitev z UI kaže kot povečana generativna zmogljivost za raziskovanje projektnih alternativ, izboljšano prepoznavanje vzorcev v kompleksnih podatkovnih nizih ter razširjen spomin za shranjevanje in priklic velikih količin predhodnega znanja in tehničnih specifikacij [Clark, Chalmers, 1998].

Konceptualni okvir 3P je primer kognitivne razširitve pri arhitekturnem načrtovanju, pri čemer inženiring pozivov, obdelava z UI in postprodukcija s strani človeka tvorijo kognitivni sistem, porazdeljen med človeške in strojne akterje. V birojih, kot sta MVRDV in ZHA, se oblikovalske zamisli razvijajo v interakciji med človeškimi pozivi in strojno generiranimi različicami, pri čemer končni koncept nastaja v sodelovanju med obema akterjema [Barker, 2023; Rubio, 2024].

Paradigma kognitivne razširitve ima pomembne posledice za arhitekturno izobraževanje. Študenti morajo razviti metakognitivne spretnosti, torej zavedanje lastnih miselnih procesov in razumevanje, kako jih učinkovito razširjati z zmožnostmi UI [Nag et al., 2025]. Pismenost na področju

Kriterij	ZHA	MVRDV	Studio Tim Fu
Poudarek v okviru 3P	Poziv + postprodukcija	Uravnotežene vse faze	Vse faze z razširjenim procesiranjem
Pristop k pozivom	Slogovne reference, parametrična estetika	Konceptualne skice, ključne besede	Kulturni kontekst, referenčni podatki
Raven uporabe UI	Standardni generativni modeli	Generativni + parametrični pristopi	Generativni modeli z vključevanjem konteksta
Vloga arhitekta	Selekcija in slogovna kontrola	Analiza in interpretacija podatkov	Interpretacija in kuriranje konteksta
Ključna vloga UI	Vizualno raziskovalno orodje	Raziskovalni in analitični instrument	Sodelovalni soustvarjalec

Preglednica 3. Primerjalna analiza obravnavanih primerov glede na faze konceptualnega okvira 3P

5 DISKUSIJA

5.1 Vpliv na arhitekturno prakso in izobraževanje

Vključevanje UI v arhitekturno prakso spreminja poklic, saj vpliva na delovne postopke, zahteve glede znanja in spretnosti ter naravo arhitekturnega dela. UI skrajša čas, potreben za raziskovanje projektnih alternativ, kar arhitektom omogoča hitro ustvarjanje in ocenjevanje več sto možnosti. Ker UI prevzema del nalog generiranja alternativnih možnosti načrtovanja, se vloga arhitektov pomika h kreativnemu usmerjanju in kritičnemu vrednotenju, ki vključuje izbiro in izpopolnjevanje strojno generiranih rezultatov ter poudarja presojo, vrednote in razumevanje konteksta [Carrasco, 2024].

inženiringa pozivov postaja vse pomembnejša, saj zahteva oblikovanje natančnih, jasnih in ciljno usmerjenih besedilnih opisov [Bansal, 2024]. Arhitekturno izobraževanje bi moralo vključevati sodelovalne delovne procese, v katerih se študenti naučijo učinkovito sodelovati z UI kot partnerjem pri načrtovanju. To nakazuje premik od tehničnih proizvodnih veščin k strateškemu razmišljanju o tem, kako učinkovito usmerjati in kurirati vsebine, ki jih ustvarja UI [Salazar Rodriguez et al., 2025]. Pri tem je pomembno poudariti, da spretnosti, povezane z uporabo UI, ne nadomeščajo temeljnih arhitekturnih kompetenc, temveč jih dopolnjujejo. Kritično mišljenje, prostorsko razumevanje in oblikovalska presoja ostajajo ključne veščine arhitekta, medtem ko sposobnosti sodelovanja z UI pomenijo dodatno plast znanja, ki razširja obstoječe načine načrtovanja.

5.2 Etični vidiki in avtorstvo

Vključevanje generativne UI v arhitekturno prakso odpira pomembna etična vprašanja. Sistemi UI, usposobljeni na obstoječih arhitekturnih podatkih, lahko ohranijo pristranskost teh podatkov, kar lahko marginalizira nezahodne arhitekturne tradicije ali okrepi vprašljive prostorske ureditve [Foka, 2024]. Ker arhitekti vse pogosteje uporabljajo vizualne podobe in koncepte, ki jih ustvarja UI, se pojavljajo vprašanja glede ustrezne razkritja uporabe UI strankam in javnosti ter preglednosti pri predstavitvi oblikovalskega dela.

Sodelovalna narava oblikovalskih procesov med človekom in UI zapleta tradicionalna pojmovanja avtorstva in intelektualne lastnine. Pravni okviri za avtorske pravice niso bili zasnovani z mislijo na soustvarjanje UI, kar povzroča negotovost glede lastništva projektov, ki jim je pomagala UI [Mazzi, 2024]. Nekatere arhitekturne prakse, kot je pri biroju ZHA, so začele uveljavljati avtorstvo podob, ki jih je ustvarila UI, če so jih ustrezno ocenili, izbrali, generirali z lastnimi pozivi in dodelali človeški arhitekti, kar kaže na nastajajočo normo, po kateri se človeško kuriranje obravnava kot zadostna podlaga za zahtevanje avtorstva [Barker, 2023]. Najuspešnejši pristopi k poklicni odgovornosti ohranjajo avtoriteto arhitekta pri sprejemanju odločitev, pri čemer UI ne deluje avtonomno, temveč znotraj interakcij, ki jih oblikujejo cilji, odločitve in interpretacije arhitekta [Holter, El-Assady, 2024].

5.3 Omejitve raziskave in smeri za prihodnje delo

Ta raziskava ima več omejitev, ki jih je treba upoštevati pri interpretaciji ugotovitev:

Prvič, konceptualna narava okvira: konceptualni okvir 3P je sinteza literature in opazovanih praks, ne empirično validiran model. Prihodnje raziskave bi ga morale preveriti z empiričnimi metodami, na primer s strukturiranimi intervjuji z arhitekti ali sistematičnim opazovanjem delovnih procesov v arhitekturnih birojih.

Drugič, omejitev na konceptualno fazo: okvir opisuje sodelovanje človek–UI v konceptualni fazi načrtovanja; širitev na druge faze arhitekturnega in gradbenega procesa (razvoj dokumentacije, inženiring, gradnja) ostaja odprta za prihodnje raziskave.

Tretjič, omejitev na vizualne vsebine: okvir se osredotoča pretežno na generacijo vizualnih konceptov; uporaba UI za npr. prostorsko optimizacijo, energetsko analizo ali dokumentacijo zahteva nadaljnje raziskave, zlasti v smeri integracije teh orodij v celovit arhitekturni proces ter njihovega vpliva na odločitvene in izvedbene faze načrtovanja.

Četrto, hiter razvoj tehnologije: ugotovitve odražajo stanje v obdobju 2020–2025. Glede na hitrost tehnološkega razvoja na področju generativne UI je mogoče, da bodo nekatera spoznanja v kratkem času presežena.

Petič, omejitev virov: ilustrativni primeri temeljijo na javno dostopnih virih (objavljeni intervjuji, spletni članki, predstavitve), ne na neposrednem vpogledu v delovne procese obravnavanih studijev.

Morebitna širitev predlaganega konceptualnega okvira na druge faze gradbeno-arhitekturnega procesa, vključno z integracijo v sisteme informacijskega modeliranja gradenj (BIM) in digitalne dvojčke, predstavlja možno smer za prihodnje raziskave.

6 SKLEP

V tem preglednem članku je bila preučena integracija generativne umetne inteligence v arhitekturno konceptualno načrtovanje, pri čemer je bil predlagan konceptualni okvir 3P (poziv, procesiranje, post-produkcija) kot orodje za razumevanje in strukturiranje sodelovalnega procesa med arhitektom in generativnimi orodji UI.

Konceptualni okvir 3P prispeva k razumevanju tega sodelovanja na tri načine.

Prvič, strukturira kompleksni proces interakcije med arhitektom in UI v tri jasno razločljive, a medsebojno povezane faze.

Drugič, omogoča primerjalno analizo različnih praks; ilustrativni primeri birojev ZHA, MVRDV in Studio Tim Fu kažejo, da se okvir prilagodljivo odraža v raznolikih kontekstih, od uporabe standardnih generativnih modelov do prilagojenih sistemov z lokalnimi podatki.

Tretjič, poudarja osrednjo vlogo arhitekta v fazah poziva in postprodukcije ter UI pozicionira kot kognitivnega partnerja, ki razširja človeške ustvarjalne in analitične zmožnosti, ne pa jih nadomešča.

Analiza ilustrativnih primerov razkriva skupni vzorec: uspešno vključevanje UI v arhitekturno prakso ni odvisno le od tehnoloških zmogljivosti, temveč tudi od ustreznih delovnih postopkov, znanj in organizacijskih struktur. Poudarek na zgodnjih fazah načrtovanja, iterativni dialog med človekom in UI ter ohranjanje arhitektove vloge pri usmerjanju in vrednotenju so ključne značilnosti uspešnih praks.

Ugotovitve zagovarjajo prilagodljiv in etično utemeljen pristop k vključevanju UI v arhitekturo. Vprašanja pristranskosti podatkov, avtorstva in preglednosti uporabe UI zahtevajo nadaljnjo obravnavo strokovne skupnosti. Predlagani konceptualni okvir 3P je izhodišče za prihodnje empirične raziskave, ki bodo naslovile njegovo preverjanje in morebitno prilagoditev različnim projektnim, organizacijskim in izobraževalnim kontekstom. Širitev okvira na druge faze gradbeno-arhitekturnega procesa, vključno z integracijo v sisteme informacijskega modeliranja gradenj in digitalne dvojčke, predstavlja pomembno smer za prihodnje delo.

7 VIRI

Ansara, C. (2023). AI and prompt architecture – A literature review. *International Journal of Computer Applications*, 185(34), 39–45. <https://doi.org/10.5120/ijca2023923133>

Avinç, G. M., Aycı, H., Taş, A. (2025). The role of artificial intelligence in architecture: The case studies of star architects. *Rupkatha Journal*, 17(1). <https://doi.org/10.21659/rupkatha.v17n1.04>

- Bansal, P. (2024). Prompt Engineering Importance and Applicability with Generative AI. *Journal of Computer and Communications*, 12, 14–23. <https://doi.org/10.4236/jcc.2024.1210002>
- Barker, N. (2023, 26. april). Zaha Hadid Architects developing "most" projects using AI-generated images says Patrik Schumacher. *Dezeen*. <https://www.dezeen.com/2023/04/26/zaha-hadid-architects-patrik-schumacher-ai-dalle-midjourney/>
- Caetano, I., Santos, L., Leitão, A. (2020). Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), 287–300. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.008>
- Calixto, V., Croffi, J. (2024). Back to Black Boxes? An Urgent Call for Discussing the Impacts of the Emergent AI-Driven Tools in the Architecture Design Education. *CAADRIA 2024 Proceedings*
- Carrasco, M. (2024). AI and cognitive offloading: Sharing the thinking process with machines. *UX Design*. <https://uxdesign.cc/ai-and-cognitive-offloading-sharing-the-thinking-process-with-machines-2d27e66e0f31>
- Clark, A., Chalmers, D. (1998). The extended mind. *Analysis*, 58(1), 7–19. <https://doi.org/10.1093/analys/58.1.7>
- Foka, A. (2024). AI, cultural heritage, and bias: Challenges and potential solutions. *Heritage Journal*, 7(11), 287. <https://doi.org/10.3390/heritage7110287>
- Fricker, P. C. (2021). The relevance of computational design thinking in landscape architecture: A pedagogy of data-informed design processes across scales (doktorska disertacija, ETH Zurich). *ETH Zurich Research Collection*. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000495639>
- Grant, M. J., Booth, A. (2009). A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, 26(2), 91–108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Holmes, J. (2024, 20. avgust). How AI in architecture is shaping the future of design and construction. *Autodesk*. <https://www.autodesk.com/design-make/articles/ai-in-architecture>
- Holter, S., El-Assady, M. (2024). Deconstructing human-AI collaboration: Agency, interaction, and adaptation (arXiv:2404.12056). *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2404.12056>
- Hurst, W. (2023, 20. februar). Seven practical AI tips: how and when to use generative design. *Architects' Journal*. <https://www.architectsjournal.co.uk/news/seven-practical-ai-tips-how-and-when-to-use-generative-design>
- Jabareen, Y. (2009). Building a conceptual framework: philosophy, definitions, and procedure. *International Journal of Qualitative Methods*, 8(4), 49–62. <https://doi.org/10.1177/160940690900800406>
- Magzoid. (2025). Studio Tim Fu showcases AI-driven architecture at Lake Bled. <https://magzoid.com/studio-tim-fu-showcases-ai-driven-architecture-at-lake-bled/>
- Mazzi, F. (2024). Authorship in artificial intelligence-generated works: Rethinking originality and human creativity. *Journal of World Intellectual Property*, 27(1), 3–20. <https://doi.org/10.1111/jwip.12310>
- MVRDV. (2024). MVRDV NEXT. <https://www.mvrdv.com/themes/15/next>
- Nag, A., Boricha, J., Sarkar, A. (2025). Architectural education: AI integrative challenges and prospects. *V Effective Instructional Design Informed by AI* (str. 383–408). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-6527-4.ch013>
- PA Academy. (2024). Tim Fu's AI-driven architecture design with generative AI. <https://paacademy.com/blog/tim-fus-ai-driven-architecture-design-with-generative-ai>
- Parametric Architecture. (2024). Zaha Hadid Architects use AI image generators for designs. <https://parametric-architecture.com/zaha-hadid-architects-using-ai-image-generators-for-design-concepts-said-patrik-schumacher/>
- Pektaş, Ş. T., Sağlam, B. (2025). Semiotics-based prompt engineering for architectural text-to-image generation processes. *Estoa. Journal of the Faculty of Architecture and Urbanism*, 14(28), 121–135. DOI: 10.18537/est.v014.n028.a09
- Rubio, S. (2024). How MVRDV is using AI to design its buildings. *Architecture Now*. <https://architecturenz.co.nz/articles/how-mvrdv-is-using-ai-to-design-its-buildings/>
- Salazar Rodriguez, J. D., Joyce, S. C., Sockalingam, N., Khoo, E. T., Julfendi. (2025). Large Language Models in Architecture Studio: A Framework for Learning Outcomes. *arXiv preprint arXiv:2510.15936*. <https://arxiv.org/abs/2510.15936>
- Salma, Z., Hijón-Neira, R., Pizarro, C. (2025). Designing co-creative systems: Five paradoxes in human-AI collaboration. *Information*, 16(10), 909. <https://doi.org/10.3390/info16100909>
- Schneider, J., Kilic, S., Stockhammer, D. (2025). Empowering Clients: Transformation of Design Processes Due to Generative AI. *arXiv preprint arXiv:2411.15061*.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Stathaki, E. (2025). How to use AI in architecture? A practical guide with Tim Fu. *Wallpaper*. <https://www.wallpaper.com/architecture/how-to-use-ai-in-architecture-practical-guide>
- Zhou, J., Li, R., Tang, J., Tang, T., Li, H., Cui, W., Wu, Y. (2024). Understanding Nonlinear Collaboration between Human and AI Agents: A Co-design Framework for Creative Design.
- V: Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '24). DOI: 10.1145/3613904.3642812



Martina Stopar, mag. inž. grad.
martina.stopar@c-i.si



doc. dr. Bojan Čas, univ. dipl. inž. grad.
bojan.cas@fgg.uni-lj.si



doc. dr. Peter Češarek, univ. dipl. inž. grad.
peter.cesarek@fgg.uni-lj.si
Univerza v Ljubljani,
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek
UDK/UDC: 531/534:519.673:625.745.11

VPLIV TEMPERATURE IN DUŠENJA NA VIBRACIJE BRVI Z NOSILNIM SISTEMOM NATEZNEGA TRAKU: ŠTUDIJA PRIMERA BRVI V IRČI VASI

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE AND DAMPING ON THE VIBRATIONS OF A STRESS RIBBON FOOTBRIDGE: CASE STUDY OF FOOTBRIDGE IN IRČA VAS

Povzetek

Mostovi oz. brvi z nosilnim sistemom nateznega traku so specifične in tehnološko zahtevne konstrukcije, ki so zaradi svoje vitkosti dovzetne za vibracije, ki nastanejo kot posledica dinamičnega vzburjanja zaradi hoje in teka pešcev in tekačev. Njihov dinamični odziv je močno odvisen od temperaturnih sprememb, ki vplivajo na togost brvi, ter od dušenja, ki ga je vnaprej težko natančno oceniti.

V prispevku predstavimo, kakšen vpliv imajo temperaturne spremembe in dušenje na vibracije brvi z nosilnim sistemom nateznega traku ter posledično na udobje uporabnikov. Preučevanje omenjenih vplivov smo izvedli na konkretni brvi za pešce in kolesarje čez reko Krko v Irči vasi pri Novem mestu, ki je prva in trenutno edina konstrukcija tega tipa v Sloveniji. V prispevku je predstavljen računski model obravnavane brvi, katerega odziv je primerjan z dejansko izmerjenim statičnim in dinamičnim odzivom brvi. Predstavljene so tudi ugotovitve obsežnih parametričnih dinamičnih analiz, ki so bile izvedene ob različnih temperaturnih pogojih in pri različnih deležih kritičnega dušenja.

Ključne besede: natezni trak, brv Irča vas, vibracije, pešci, temperaturne spremembe, dušenje

Summary

Stress ribbon bridges and footbridges are specific and technologically demanding structures which, due to their slenderness, are susceptible to vibrations resulting from dynamic excitation caused by pedestrian and runner activity. Their dynamic response is highly dependent on temperature changes that affect the stiffness of the structure, as well as on damping, which is difficult to estimate accurately in advance.

This article examines the influence of temperature variations and damping on the vibrations of a stress ribbon footbridge and, consequently, on user comfort. The case study of these effects was conducted on the pedestrian and cyclist bridge over the Krka River in Irča vas near Novo mesto, which is the first and currently the only structure of this type in Slovenia. The article also presents a numerical model of the analysed footbridge, with its response compared to the measured static and dynamic response of the actual structure. Furthermore, the findings of extensive parametric dynamic analyses are presented, performed under varying temperature conditions and considering different ratios of critical damping.

Key words: stress ribbon, footbridge Irča vas, vibrations, pedestrians, temperature changes, damping

1 UVOD

Mostovi z nosilnim sistemom nateznega traku (ang. stress ribbon bridges) predstavljajo specifično vrsto mostov in spadajo med zahtevnejše konstrukcije tako z vidika načrtovanja kot z vidika tehnologije njihove izgradnje. Lahko bi dejali, da imamo opraviti z neke vrste visečimi konstrukcijami, sestavljenimi iz rahlo povešenih napetih kablov, ki so vgrajeni v armiranobetonsko prekladno ploščo mostu. Ta je v primerjavi z velikim razponom izjemno tanka, kar daje tovrstnim konstrukcijam eleganten in lahkoten videz, ki se lepo umesti v naravno okolje, zaradi česar so takšni tipi mostov največkrat uporabljeni kot brvi za pešce in kolesarje [Strasky, 2011]. Zaradi izjemne vitkosti pa so omenjene brvi dovezetnejše za nastanek vibracij, ki nastanejo kot posledica dinamičnega vzbujanja zaradi hoje pešcev. Te z vidika nosilnosti za konstrukcijo običajno niso nevarne, lahko pa povzročijo nelagodje in čustveno reakcijo pešcev [Heinemeyer, 2009].



Slika 1. Pogled na natezni trak brvi za pešce in kolesarje čez reko Krko v Irči vasi [Ponting, 2025]

Različne študije so pokazale, da so mostovi nateznega traku zelo občutljivi tudi na temperaturne spremembe okolja, ki zaradi raztezanja in krčenja materialov mostu spreminjajo deformacijsko-napetostno stanje in togost konstrukcije kot celote [Strasky, 2011], [Kogovšek, 2024]. Ta je namreč ena ključnih lastnosti, ki določajo odziv konstrukcije na dinamično obtežbo. Poleg tega je dinamični odziv pogojen z dušenjem, ki je izjemno kompleksen pojav, zaradi česar je njegova natančna opredelitev možna le na osnovi meritev, opravljenih, ko je brv že v celoti zgrajena [Heinemeyer, 2009].

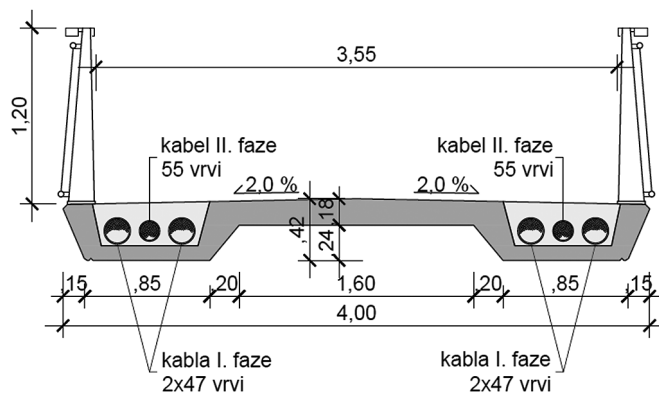
V okviru raziskav smo tako poskušali ugotoviti, kako in v kolikšni meri na vibracije brvi z nosilnim sistemom nateznega traku vplivajo temperaturne spremembe in dušenje ter kakšen vpliv imata ta dva parametra na udobje uporabnikov. Preučevanje omenjenih vplivov smo izvedli na primeru brvi za pešce in kolesarje čez reko Krko v Irči vasi pri Novem mestu, ki je prvi in trenutno edini most z nosilnim sistemom nateznega traku v Sloveniji [Weingerl, 2023]. Več podrobnosti o omenjeni tematiki je predstavljenih v [Stopar, 2025].

2 KRATKA PREDSTAVITEV BRVI ZA PEŠCE IN KOLESARJE ČEZ REKO KRKO V IRČI VASI

Gradnja brvi v Irči vasi se je začela z izvedbo podporne konstrukcije, ki jo sestavljata krajna opornika, temeljena na vodnjakih, katerih medosna oddaljenost je 131 m. Zaradi velikih horizontalnih reakcij sta oba opornika sidrana v temeljna tla s skupno 74 geotehničnimi sidri. Prvi del geotehničnih sider je bil napet po izgradnji opornikov, drugi del pa po napenjanju nosilnih kablov prekladne konstrukcije brvi.

Tudi napenjanje kablov prekladne konstrukcije je potekalo v dveh fazah. Med opornikoma so se v prvi fazi napeli štirje nosilni kabli, sestavljeni iz 47 vrvi preseka 150 mm^2 (vsak s silo 6600 kN), ki so služili za montažo 46 prefabriciranih elementov, ki predstavljajo armiranobetonski del prereza prekladne konstrukcije. Širina segmentov je $4,0 \text{ m}$, njihova debelina pa se v

prečni smeri spreminja od 42 cm na robu do 18 cm v srednjem delu. Prečni prerez konstrukcije sestavljata še dva kablja za prednapenjanje iz 55 vrvi preseka 150 mm^2 , ki sta bila po montaži prefabriciranih segmentov položena v njihove vzdolžne



Slika 2. Prečni prerez obravnavane brvi v Irči vasi [Weingerl, 2023]

kanale. Ti so bili skupaj s prečnimi utori med segmenti in krajnima monolitnima ploščama naknadno zabetonirani. Za tem je sledilo napenjanje kablov druge faze (kablov za prednapenjanje), ki so se napeli na silo 8500 kN, s čimer so se v betonski prerez vnesle tlačne napetosti za zagotovitev dodatne togosti konstrukcije. Kabelske vrvi so kvalitete Y 1860 S7-16,0-A z nizko stopnjo relaksacije in so v zaščitnih HDPE-ceveh, ki so bile po končani gradnji zainjektirane, s čimer je zagotovljena tudi visoka antikorozijska zaščita jeklenih vrvi in s tem povezana dolgoročna nosilnost ter trajnost objekta. Montažni betonski elementi so izdelani iz betona kvalitete C45/55, monolitni del prekladne plošče pa iz betona C50/60. Zasnova obravnavane brvi kot tudi tehnološki postopki njene gradnje so podrobneje predstavljeni v [Weingerl, 2023] in [Likar, 2023].

V zadnji fazi je sledila finalizacija objekta, v sklopu katere sta se izvedla epoksidni premaz pohodne površine ter obojestranska namestitve ograj [Likar, 2023]. Po končani gradnji je bila opravljena tudi obremenilna preizkušnja, ki je obsegala testiranje na statično in dinamično obtežbo [Štrukelj, 2023].

3 STATIČNA ANALIZA

Za namene lastnih računskih analiz smo v programskem okolju SOFISTiK 2024 [SOFISTiK AG, 2024] izdelali prostorski računski model obravnavane brvi. Računski model je vključeval prekladno konstrukcijo med krajnima opornikoma s svetlim razponom 120,6 m, podprto s sistemom linearnih vzmeti, ki je nadomeščal masivno sidrano podporno konstrukcijo. Togost posameznih vzmeti je bila določena na podlagi izmerjenih pomikov in zasukov krajnih opornikov med napenjanjem kablov prve faze ter obremenilno preizkušnjo.

Na izdelanem prostorskem računskem modelu smo najprej izvedli statično analizo z upoštevanjem vseh relevantnih vplivov. Na ta način smo določili »končno« napetostno-deformacijsko stanje konstrukcije, ki je predstavljalo vhodni podatek za nadaljnje dinamične analize. Na napetosti in deformacije v natezних trakovih ključno vplivajo veliki povesi prekladne konstrukcije ter faznost gradnje, zato smo uporabili geometrijsko

nelinearno analizo, ki je zajemala enajst gradbenih faz ob upoštevanju časovno odvisnih deformacij zaradi lezenja in krčenja betona ter relaksacije kablov.

Ustreznost izdelanega statičnega računskega modela smo ovrednotili s primerjavo izračunanih in izmerjenih povosov izvedene konstrukcije na sredini njenega razpona v posameznih gradbenih fazah. Kot je prikazano v preglednici 1, so odstopanja med izračunanimi in izmerjenimi povosi majhna in v mejah inženirske sprejemljivosti. Ker je ujemanje še posebej dobro v končni fazi (dograjena konstrukcija z izvršenimi reološkimi vplivi), lahko zaključimo, da je statični računski model konstrukcije ustrezno zasnovan.

4 DINAMIČNE ANALIZE

Tematiki vibracij brvi zaradi dinamične obtežbe pešcev je v sistemu veljavnih standardov Evrokod namenjena bistveno premajhna pozornost. Z namenom usklajevanja in razvoja Evrokodov je Joint Research Centre (JRC) [Heinemeyer, 2009] pripravil tehnično poročilo (v nadaljevanju JRC-smernica), ki temelji na rezultatih dveh evropskih raziskovalnih projektov. Smernica podaja postopek, ki ga je mogoče uporabiti pri projektiranju lahkih brvi na dinamične obtežbe pešcev. Omenjenemu postopku, ki je predstavljen v nadaljevanju, smo sledili tudi pri izvedbi dinamičnih analiz obravnavanega nateznega traku.

4.1 Analiza lastnega nihanja

Z analizo lastnega nihanja smo določili lastne frekvence f_i in pripadajoče efektivne mase nateznega traku v stanju takoj po izgradnji (faza št. 4080 – namestitev nenosilnih elementov). Kot prikazujemo v preglednici 2, smo lastne frekvence računskega modela primerjali z izmerjenimi lastnimi frekvencami izvedene konstrukcije, ki so bile identificirane med obremenilno preizkušnjo. Izkaže se, da je ujemanje lastnih frekvenc izjemno dobro, pri čemer znaša največje odstopanje le nekaj več kot 2 %. Izdelani računski model je, poleg ustreznega statičnega odziva, izkazoval tudi ustrezen dinamični odziv, zato smo ga ocenili kot primernega za nadaljnje računske analize.

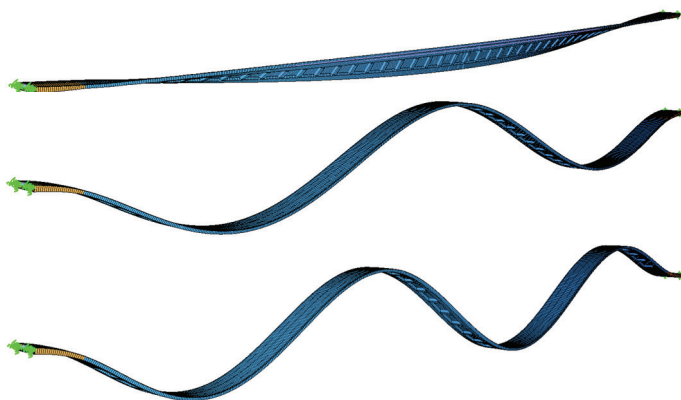
Št. faze	Opis faze	Računski model [cm]	Izmerjeno [cm]	Odstopanje [%]
4011	Namestitev in napenjanje nosilnih kablov prve faze	16,7	16,8	0,6
4030	Montaža prefabriciranih betonskih segmentov	142	152	6,6
4050	Monolitizacija prekladne konstrukcije	214	208	2,9
4071	Prednapetje druge faze	185	175	5,7
4075	Lezenje in krčenje do namestitve nenosilnih elementov	175	-	-
4080	Namestitev nenosilnih elementov	178	177	0,6
4090	Obremenilna preizkušnja	190	190	0,0
4099	Lezenje in krčenje do $t = \infty$	169	170 (ocena)	0,6

Preglednica 1. Primerjava povosov na sredini razpona nateznega traku po posameznih fazah gradnje; računski model in meritve na izvedeni konstrukciji [Weingerl, 2023]

i	Identificirane f_i [Hz]	Izračunane f_i [Hz]	Odstopanje [%]
1	0,659	0,658	0,2
2	0,977	0,964	1,3
3	-	1,189	-
4	1,489	1,490	0,0
5	1,880	1,842	2,0
6	-	2,044	-
7	2,686	2,656	1,1
8	-	3,008	-
9	3,369	3,323	1,4
10	-	3,658	-
11	4,126	4,054	1,7
12	-	4,850	-
13	5,078	4,960	2,3
14	5,835	5,714	2,1
15	-	6,245	-
16	-	6,648	-
17	6,787	6,710	1,1
18	7,837	7,654	2,3

Preglednica 2. Primerjava lastnih frekvenc izdelanega računskega modela in izmerjenih lastnih frekvenc na izvedeni konstrukciji [Štrukelj, 2023]

V povezavi z lastnimi frekvencami brvi dodajamo, da JRC-smernica [Heinemeyer, 2009] navaja kritična območja lastnih frekvenc, ki so dovzetna za vzbujanje z dinamično obtežbo, ki jo povzroča tok pešcev. Kritične lastne frekvence za vzbujanje v vertikalni in vzdolžni smeri so v območju med 1,25 in 2,3 Hz, v prečni smeri pa med 0,5 in 1,2 Hz. Za vse nihajne oblike brvi z lastnimi frekvencami znotraj navedenih kritičnih območij je treba izvesti kontrolo pospeškov brvi. V našem primeru so to 3. prečna ter 4. in 6. vertikalna nihajna oblika.



Slika 3. Analiza lastnega nihanja obravnavanega nateznega traku: 3. 4. in 6. nihajna oblika

4.2 Dušenje

Dušenje je mogoče razumeti oz. predstaviti kot disipacijo energije znotraj konstrukcije, ki jo povzročata lastno dušenje konstrukcijskih materialov ter nekonstrukcijskih elementov brvi, kot so oprema, ograje in obloge. Zaradi soobstoja različnih mehanizmov disipacije energije je dušenje izjemno kompleksen pojav, ki ga je mogoče natančno opredeliti le na osnovi meritev, opravljenih, ko je brv že v celoti zgrajena [Heinemeyer, 2009]. Zaradi navedenega je bilo na brvi v Irči vasi med obremenilno preizkušnjo identificirano tudi dušenje. Iz meritev 4. nihajne oblike so ocenili, da znaša delež kritičnega dušenja ξ od 1,6 % do 2,2 % [Štrukelj, 2023]. Na podlagi navedenega podatka smo v opravljenih računskih analizah za delež kritičnega dušenja privzeli vrednost 2,0 % in sicer za vse nihajne oblike. Pri tem smo uporabili t. i. Rayleighov model dušenja [Chopra, 2020].

4.3 Določitev maksimalnega pospeška

Ob redni uporabi so brvi podvržene sočasnemu delovanju obtežb več pešcev, pri čemer to delovanje ni le seštevek dejanj posameznikov, saj je obtežba pešcev naključna. Maksimalni pospešek konstrukcije, ki ga povzroči tok naključnih pešcev različnih gostot, je mogoče, skladno s smernico [Heinemeyer, 2009], izračunati na dva načina, in sicer s spektralno metodo ali s časovno odvisno analizo ob upoštevanju harmoničnega obtežnega modela. V obsegu opravljenih računskih dinamičnih analiz smo upoštevali oba navedena načina. JRC-smernica [Heinemeyer, 2009] razvršča gostote tokov pešcev v pet prometnih razredov, ki so predstavljeni v preglednici 3.

Prometni razred	Gostota d [P/m ²] (P – pešec)	Opis	Značilnosti
TC1	15/(BL)	Zelo redke promet	Skupina 15 pešcev (B – širina, L – dolžina prekladne konstrukcije)
TC2	0,2	Redke promet	Prosta in udobna hoja, prehitevanje je možno, posamezni pešči lahko prosto izbirajo hitrost hoje.
TC3	0,5	Gost promet	Še vedno neovirana hoja, prehitevanje je lahko občasno onemogočeno.
TC4	1,0	Zelo gost promet	Svoboda gibanja je omejena, hoja je ovirana, prehitevanje ni več možno.
TC5	1,5	Izjemno gost promet	Neprijetna hoja, nastajanje gneče, nihče od pešcev ne more več prosto izbirati hitrosti.

Preglednica 3. Prometni razredi in pripadajoče gostote tokov pešcev [Heinemeyer, 2009]

Poleg maksimalnega pospeška, ki ga povzroči tok naključnih pešcev, smo maksimalni pospešek določili še za skupino štirih popolnoma usklajenih tekačev, kjer smo obtežbo upoštevali kot deterministično. V tem primeru je bila izvedena časovno odvisna analiza s premikajočo se obtežbo skupine tekačev [Bachmann, 1995].

4.3.1 Spektralna metoda za tok pešcev

Spektralna metoda ne zahteva časovno odvisne analize, pač pa zadostuje le izvedba analize lastnega nihanja, s katero določimo vrednosti lastnih frekvenc in efektivnih mas. Z uporabo enačb in konstant, ki so bile izpeljane na podlagi simulacij Monte Carlo [Heinemeyer, 2009], lahko na relativno preprost način izračunamo vrednost maksimalnega pospeška.

Ob upoštevanju prometnega razreda TC3 (gost promet) s pripadajočo gostoto pešcev $d = 0,5 \text{ P/m}^2$ dobimo naslednje maksimalne pospeške za kritične nihajne oblike:

Nihajna oblika i	3	4	6
Lastna frekvenca f_i [Hz]	1,189	1,490	2,044
Smer nihanja	prečna	vertikalna	vertikalna
Efektivna masa m_i [t]	280,6	48,0	74,8
Maksimalni pospešek a_{max} [m/s^2]	0,053	1,591	1,173
Redukcijski koeficient ψ	0,05	0,53	1,00
Reduciran maksimalni pospešek ψa_{max} [m/s^2]	0,0029	0,848	1,173

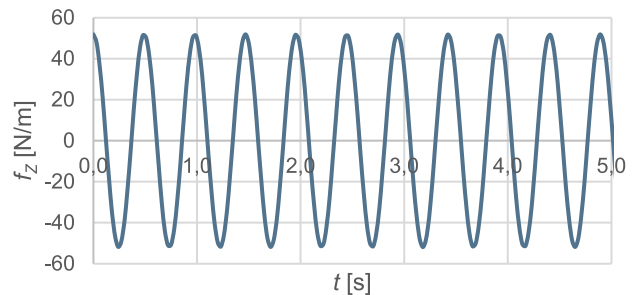
Preglednica 4. Izračun maksimalnega pospeška po spektralni metodi skladno s [Heinemeyer, 2009]

Pri izračunih smo upoštevali tudi redukcijski koeficient ψ , ki upošteva verjetnost, da se frekvenca korakov približa kritičnemu območju obravnavanih lastnih frekvenc ob upoštevanju vzbujanja s prvo harmonično frekvenco obtežbe pešcev.

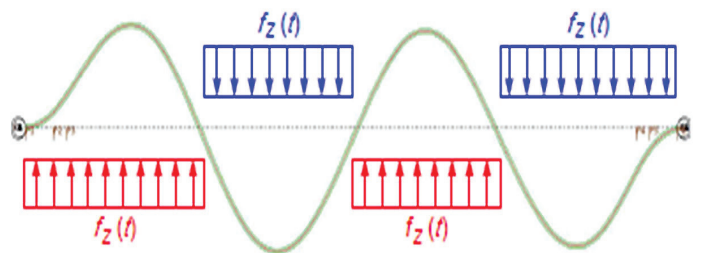
4.3.2 Časovno odvisna analiza s harmoničnim obtežnim modelom za tok pešcev

Za modeliranje toka pešcev, ki ga sestavlja n naključnih pešcev, JRC-smernica [Heinemeyer, 2009] določa idealiziran tok, ki ga sestavlja n' popolnoma sinhroniziranih pešcev. Ta je določen tako, da povzroči enak učinek na konstrukcijo kot realen tok pešcev, le da ga je mogoče modelirati kot deterministično obtežbo. Pri takšnem obtežnem modelu je harmonična obtežba enakomerno porazdeljena vzdolž brvi in simulira enako število pešcev na fiksni lokaciji. V odvisnosti od gostote toka pešcev je treba izbrati enega od dveh obtežnih modelov, in sicer za tokove z manjšo gostoto ($d < 1,0 \text{ P/m}^2$) in gostejše tokove ($d \geq 1,0 \text{ P/m}^2$).

Harmonični model predpostavlja, da je frekvenca korakov idealiziranega toka pešcev enaka obravnavani lastni frekvenci brvi. Primer obtežne funkcije za 6. nihajno obliko in ob upoštevanju prometnega razreda TC3 ($d = 0,5 \text{ P/m}^2$) je prikazan na sliki 4. Enakomerno porazdeljeno harmonično obtežbo je treba aplicirati na računski model skladno z obravnavano nihajno obliko, kot prikazujemo na sliki 5.



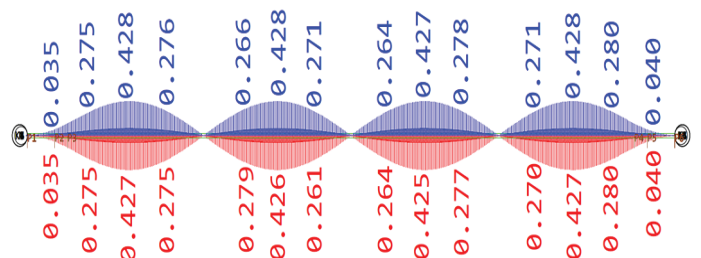
Slika 4. Harmonična obtežna funkcija vzbujanja v vertikalni smeri za 6. nihajno obliko



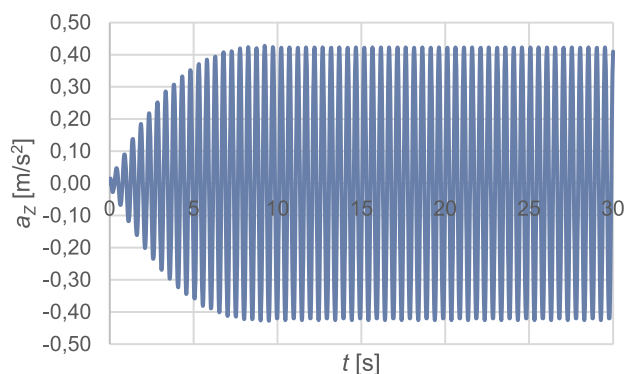
Slika 5. Delovanje vertikalne harmonične obtežbe za 6. nihajno obliko

V izvedenih dinamičnih analizah je časovni korak znašal $\Delta t = 0,03 \text{ s}$. Konstrukcijo smo s harmonično obtežbo vzbujali 30 s, za kar je bilo potrebnih 1000 časovnih korakov. Za reševanje enačbe gibanja smo uporabili implicitno Hilber-Hughes-Taylorjevo metodo (HHT- α) [Hilber, 1977], kot je implementirana v programskem paketu SOFISTIK z vrednostjo parametra $\alpha = -0,3$, ki povzroča dobro dušenje v visokofrekvenčnih območjih [Hilber, 1977].

Rezultat časovno odvisnih analiz predstavljajo časovno odvisni pospeški konstrukcije. Na sliki 6 je prikazana ovojnica pospeškov pri vzbujanju 6. nihajne oblike. Za točko na osmini razpona, v kateri se pojavi največji pospešek, je na sliki 7 prikazan še časovni razvoj pospeškov.



Slika 6. Ovojnica vertikalnih pospeškov za 6. nihajno obliko



Slika 7. Vertikalni pospešek točke na osmini razpona za 6. nihajno obliko v odvisnosti od časa

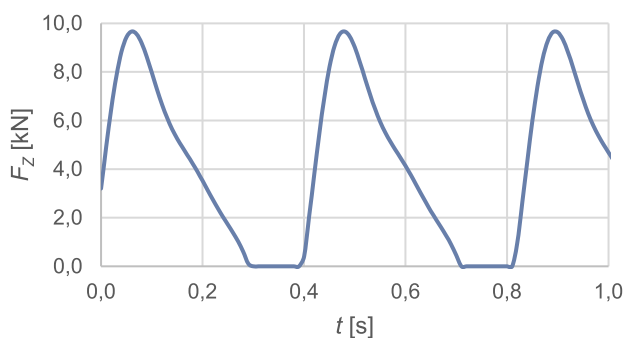
Rezultati maksimalnih pospeškov vseh obravnavanih nihajnih oblik, dobljenih s časovno odvisno analizo, so naslednji:

- 3. nihajna oblika; $a_{max} = 0,0027 \text{ m/s}^2$
- 4. nihajna oblika; $a_{max} = 0,271 \text{ m/s}^2$
- 6. nihajna oblika; $a_{max} = 0,428 \text{ m/s}^2$

Maksimalni vertikalni pospeški 4. in 6. nihajne oblike, ki so določeni s časovno odvisno analizo, so bistveno manjši kot tisti, ki so določeni s spektralno metodo. Pri tem je treba omeniti tudi, da je bila slednja razvita na modelih mostov s statičnim sistemom nosilca. JRC-smernica [Heinemeyer, 2009] tudi opozarja, da je v primerih, ko se statični sistem obravnavane brvi bistveno razlikuje od sistema nosilca, treba razmisliti o uporabnosti te metode. Kot se očitno izkaže, daje spektralna metoda pri brveh z nosilnim sistemom nateznega traku konservativne rezultate. Glede na izračunane številčne vrednosti so ti zagotovo na varni strani, zavedati pa se je treba, da lahko uporaba konservativnih postopkov privede do neracionalne konstrukcijske zasnove tovrstnih brvi.

4.3.3 Časovno odvisna analiza s premikajočo se obtežbo skupine tekačev

Dinamične sile tekačev je mogoče opisati kot funkcijo časa in prostora, ki se periodično ponavljajo v enakomernih časovnih intervalih. Vsako periodično vzbujaje, kakršna je tudi sila zaradi ritmičnega gibanja človeškega telesa, lahko matematično zapišemo s Fourierjevo vrsto [Bachmann, 1995].



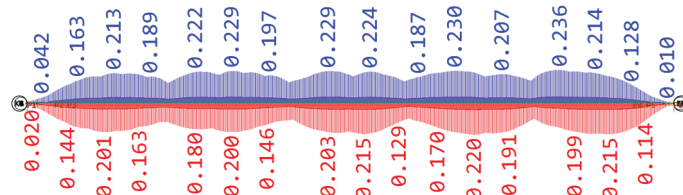
Slika 8. Obtežna funkcija – časovni potek vertikalne komponente obtežbe skupine štirih tekačev

Fourierjeve koeficiente oz. dinamične faktorje obtežbe so z eksperimentalnimi raziskavami za različne vrste aktivnosti izmerili različni avtorji. V našem primeru smo pri določitvi obtežne funkcije tekačev upoštevali Bachmannove koeficiente za tek [Bachmann, 1995].

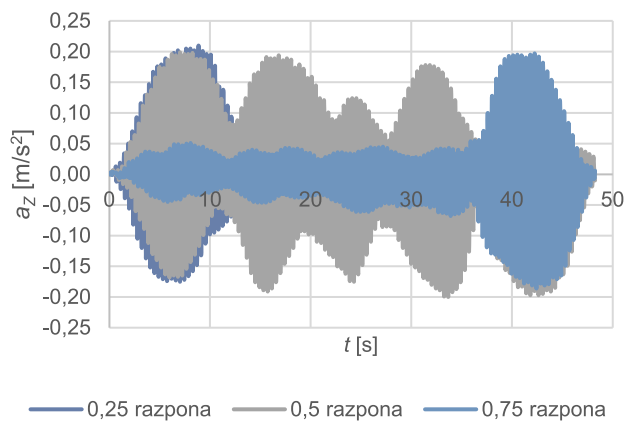
Obravnavali smo skupino štirih tekačev, ki so med seboj popolnoma usklajeni. Ti tečejo s frekvenco korakov $f_s = 2,4 \text{ Hz}$ ter se vzdolž brvi premikajo s hitrostjo $v_s = 2,5 \text{ m/s}$. Na ta način obtežbe nismo obravnavali kot naključne kot v predhodnih primerih, temveč kot povsem deterministično. Uporabljeno obtežno funkcijo prikazuje slika 8.

Časovno odvisna nelinearna dinamična analiza s časovnim korakom $\Delta t = 0,03 \text{ s}$ je trajala skupaj 48,24 s, in sicer vse dokler obtežba ni prepotovala celotne dolžine brvi. Za to je bilo potrebnih kar 1608 časovnih korakov. Za reševanje enačbe gibanja smo ponovno uporabili metodo HHT- α z vrednostjo parametra numeričnega dušenja $\alpha = -0,3$.

Slika 9 prikazuje ovojnico vertikalnih pospeškov med računsko analizo prehoda štirih tekačev preko brvi. Za točke, ki so na četrtini, polovici in treh četrtinah razpona, so na sliki 10 prikazani še vertikalni pospeški v odvisnosti od časa. Največji izračunani vertikalni pospešek pri prehodu štirih medsebojno usklajenih tekačev preko brvi je znašal $0,236 \text{ m/s}^2$.



Slika 9. Ovojnica vertikalnih pospeškov zaradi skupine tekačev



Slika 10. Vertikalni pospeški treh točk prekladne konstrukcije brvi zaradi skupine tekačev

4.4 Kontrola razredov udobja

JRC-smernica [Heinemeyer, 2009] podaja štiri razrede udobja uporabnikov brvi ter z njimi povezane mejne vrednosti maksimalnih vertikalnih in prečnih pospeškov.

Razred udobja	Stopnja udobja	Vertikalni pospešek a_{limit} [m/s ²]	Prečni pospešek a_{limit} [m/s ²]
CL1	Maksimalna	< 0,50	< 0,10
CL2	Srednja	0,50-1,00	0,10-0,30
CL3	Minimalna	1,00-2,50	0,30-0,80
CL4	Nesprejemljiva	> 2,50	> 0,80

Preglednica 5. Razredi udobja s pripadajočimi območji mejnih pospeškov [Heinemeyer, 2009]

Obravnavana brv v Irči vasi pri toku pešcev z gostoto 0,5 P/m² z uporabo spektralne metode zadosti tretjemu razredu udobja, medtem ko izračun s časovno odvisno analizo konstrukcijo uvrsti v prvi razred. Tudi pri teku skupine tekačev preko brvi ta izpolnjuje najvišji (prvi) razred udobja.

Metoda	Nihajna oblika	a_{max} [m/s ²]	Razred udobja
Spektralna metoda (tok pešcev)	3	0,0029	CL1
	4	0,848	CL2
	6	1,173	CL3
Časovno odvisna analiza (tok pešcev)	3	0,0027	CL1
	4	0,271	CL1
	6	0,428	CL1
Časovno odvisna analiza (skupina tekačev)	/	0,236	CL1

Preglednica 6. Izračunani maksimalni pospeški in pripadajoči razredi udobja uporabnikov brvi

5 REZULTATI PARAMETRIČNIH ŠTUDIJ

Da bi ugotovili, kako sprememba temperature in dušenje vplivata na vibracije brvi v Irči vasi, ki jih povzročajo pešci in tekači, je bila izvedena serija 377 dinamičnih analiz na način, kot je predhodno predstavljen v 4. poglavju. Pri tem smo spreminjali naslednja dva parametra: (i) enakomerno temperaturno spremembo ΔT v prečnem prerezu nateznega traku in (ii) delež kritičnega dušenja ξ . Zaradi relativno nizke upogibne togosti prečnih prerezov nateznih trakov v primerjavi z njihovo osno togostjo smo vpliv neenakomerne temperaturne spremembe zanemarili. Dinamični odziv brvi smo ugotavljali za končno obratovalno stanje brvi po izvršenih vseh dolgotrajnih reoloških spremembah (faza št. 4099 – Lezenje in krčenje do $t = \infty$).

Pri analizi tokov pešcev smo upoštevali vse prometne razrede (TC1-TC5) skladno z JRC-smernico [Heinemeyer, 2009] in ustrezní obtežni model glede na gostoto tokov. Pri analizi skupine tekačev smo upoštevali tri različne frekvence teka, in sicer 2,2 Hz, 2,3 Hz in 2,4 Hz s pripadajočimi hitrostmi teka, ki so znašale 2,2 m/s, 2,4 m/s in 2,5 m/s.

5.1 Parametrična študija vpliva temperature na vibracije brvi

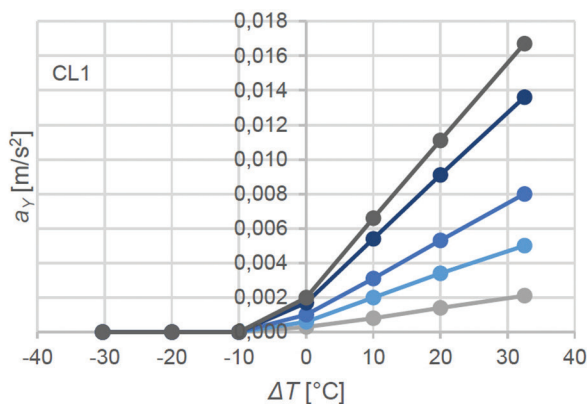
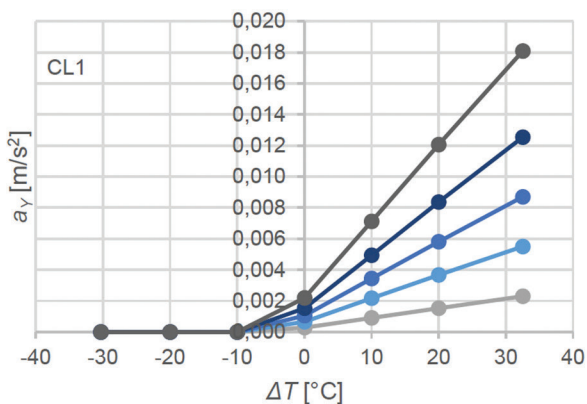
Vrednosti parametra enakomerne temperaturne spremembe ΔT smo določili na podlagi najvišje in najnižje temperature, ki jo lahko konkretno obravnavana konstrukcija doživi v svoji uporabni dobi [SIST EN 1991-1-5:2004, 2004], [SIST EN 1991-1-5:2004/A101:2009, 2009], ter za vse vmesne vrednosti temperatur konstrukcije z intervalom 10 °C. Enakomerne temperaturne spremembe so določene glede na izhodiščno temperaturo zraka v času betoniranja monolitnih delov prekladne konstrukcije v Irči vasi, ki je znašala 10 °C [ARSO, 2024].

Temperatura konstrukcije T [°C]	Temperaturna sprememba ΔT [°C]
-20,3	-30,3
-10,0	-20,0
0,0	-10,0
10,0	0,0
20,0	10,0
30,0	20,0
42,5	32,5

Preglednica 7. Obravnavane temperature konstrukcije s pripadajočimi enakomernimi temperaturnimi spremembami ΔT

Rezultati analiz, predstavljeni na slikah 11, 12 in 13, kažejo, da temperaturne spremembe pomembno vplivajo na spreminjanje togosti konstrukcije, kar se odraža tudi v spremembah lastnih frekvenc in pospeškov brvi. V odvisnosti od vrednosti temperaturnih sprememb ΔT lahko brv uvrstimo v različne razrede udobja (CL1-CL3). Mogoče je celo, da pri določenih temperaturnih spremembah ΔT lastne frekvence niso več v kritičnih območjih in tako za konstrukcijo nateznega traku v takšnih temperaturnih pogojih kontrola vibracij ni več potrebna. V nadaljevanju podajamo rezultate vpliva temperaturnih sprememb ΔT na pospeške brvi zaradi tokov pešcev.

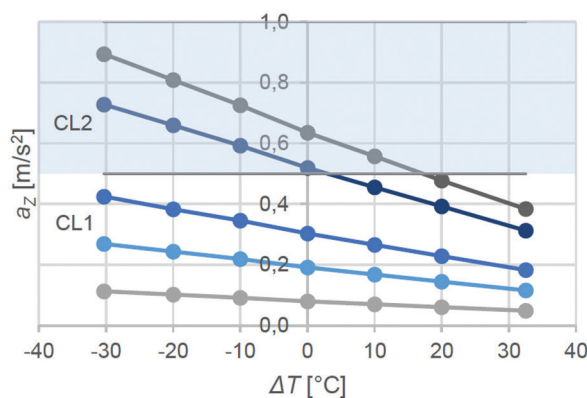
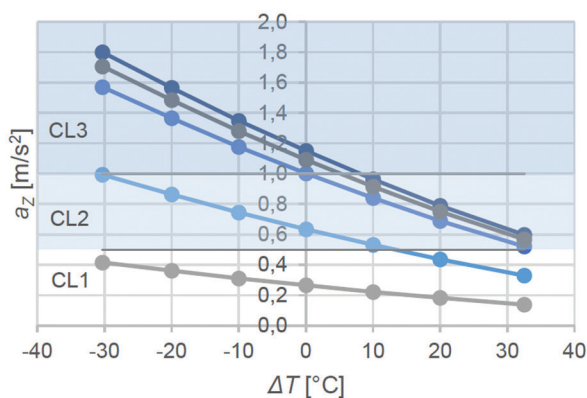
Kot je prikazano na sliki 11, se pri 3. nihajni obliki prečni pospeški zaradi toka pešcev ob segrevanju nateznega traku približno linearno povečujejo, pri ohlajanju pa privzamemo njihovo vrednost enako nič, saj izračunane lastne frekvence padejo izven kritičnega območja lastnih frekvenc. Ker so lastne frekvence 3. prečne nihajne oblike na samem robu kritičnega območja (0,5-1,2 Hz), so posledično izračunane vrednosti prečnih pospeškov zelo nizke. Višje vrednosti dosegajo vertikalni pospeški brvi. Ugotavljamo, da se pri 4. nihajni obliki z ohlajanjem vertikalni pospeški povečujejo (glej sliko 12), pri 6. nihajni obliki pa velja ravno obratna zakonitost, saj se vertikalni pospeški z ohlajanjem zmanjšujejo (glej sliko 13). Pri 6. nihajni obliki pozitivne temperaturne spremembe nimajo bistvenega vpliva na pospeške, saj so lastne frekvence segrete brvi v najbolj kritičnem območju, kjer je vrednost redukcijskega koeficienta ψ enaka 1.



— TC1 — TC2 — TC3 — TC4 — TC5

— TC1 — TC2 — TC3 — TC4 — TC5

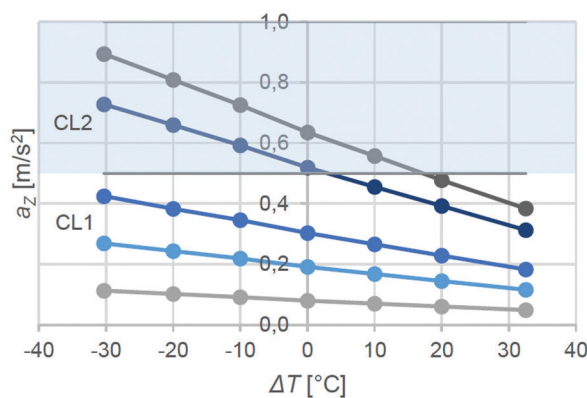
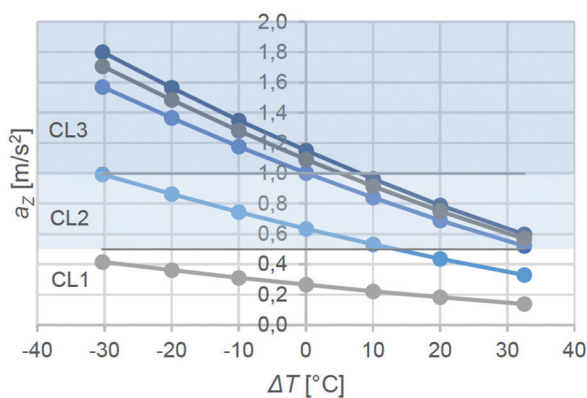
Slika 11. Prečni pospeški v odvisnosti od temperaturnih sprememb ΔT za 3. nihajno obliko – tok pešcev (spektralna metoda levo in časovno odvisna analiza desno)



— TC1 — TC2 — TC3 — TC4 — TC5

— TC1 — TC2 — TC3 — TC4 — TC5

Slika 12. Vertikalni pospeški v odvisnosti od temperaturnih sprememb ΔT za 4. nihajno obliko – tok pešcev (spektralna metoda levo in časovno odvisna analiza desno)



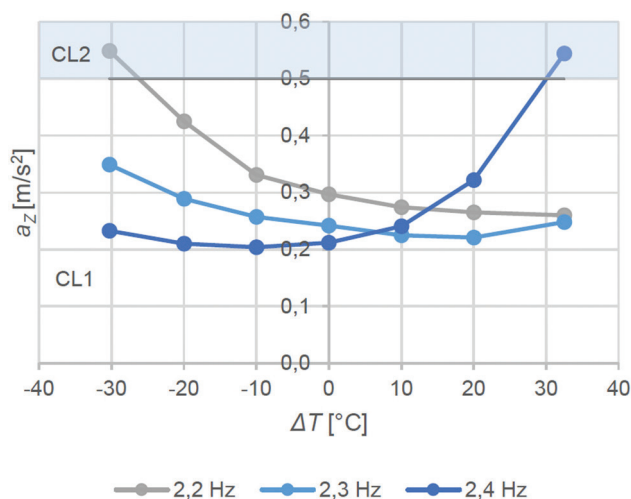
— TC1 — TC2 — TC3 — TC4 — TC5

— TC1 — TC2 — TC3 — TC4 — TC5

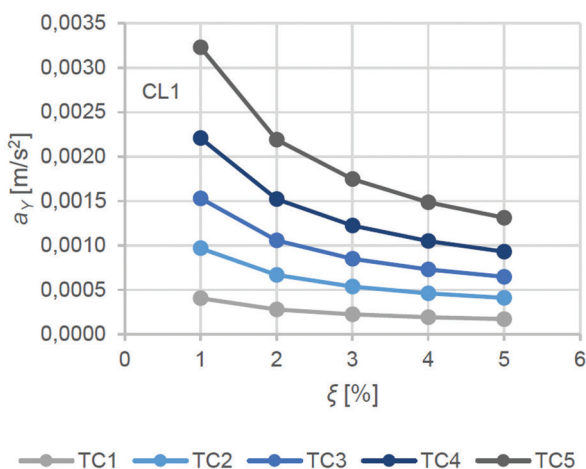
Slika 13. Vertikalni pospeški v odvisnosti od temperaturnih sprememb ΔT za 6. nihajno obliko – tok pešcev (spektralna metoda levo in časovno odvisna analiza desno)

Iz rezultatov analiz lahko opazimo tudi druge pomembne ugotovitve, kot sta spreminjanje pospeškov v odvisnosti od gostote toka pešcev oz. prometnega razreda ter razlika med uporabljenima metodama. Pri časovno odvisni analizi se pospeški povečujejo z naraščanjem prometnega razreda, medtem ko pri spektralni metodi opazimo, da so vertikalni pospeški zaradi TC4 večji od pospeškov zaradi TC5 (glej sliki 12.a in 13.a). Čeprav smernica [Heinemeyer, 2009] tega jasno ne izpostavlja, spektralna metoda očitno upošteva, da se ob večji gostoti pešcev dinamična obtežba zaradi ovirane hoje zmanjša, kar povzroči manjše vibracije. Uporabljeni metodi izkazujejo tudi razlike v velikosti vertikalnih pospeškov, kjer spektralna metoda daje bistveno višje vrednosti. Pri slednji ima sprememba temperature tudi večji vpliv na udobje uporabnikov (glej sliki 12.a in 13.a), saj se lahko z uporabo spektralne metode razred udobja brvi spremeni tudi za dva razreda, s časovno odvisno analizo pa za največ enega (glej sliki 12.b in 13.b).

Slika 14 prikazuje rezultate analize vpliva temperaturnih sprememb na vertikalne vibracije brvi, ki jih povzročata skupina



Slika 14. Vertikalni pospeški konstrukcije zaradi skupine tekačev v odvisnosti od temperaturnih sprememb

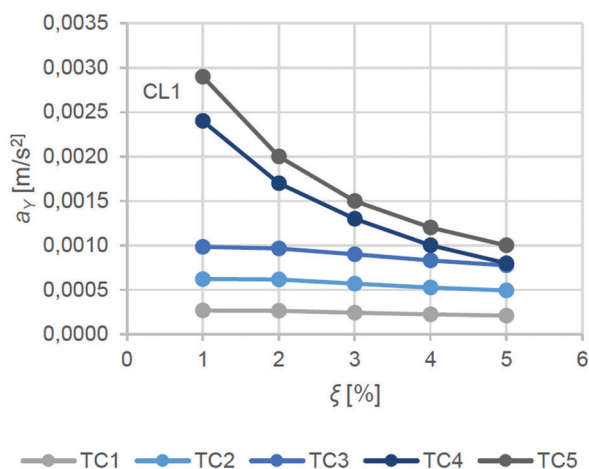


tekačev, kjer se je izkazalo, da je spreminjanje pospeškov odvisno od frekvence teka, ki se s spreminjanjem temperature približuje ali oddaljuje 6. in 7. lastni frekvenci brvi. Vpliv enakomerne temperaturne spremembe na udobje tekačev je precej majhen, saj smo izven prvega razreda udobja pri zgolj dveh ekstremnih vrednostih temperaturnih sprememb.

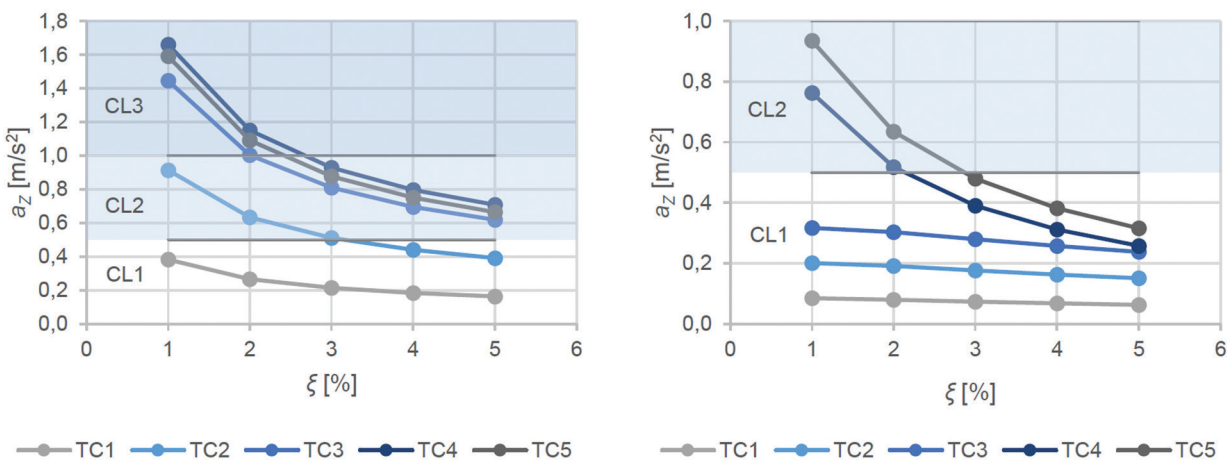
5.2 Parametrična študija vpliva dušenja na vibracije brvi

JRC-smernica [Heinemeyer, 2009] podaja povprečne vrednosti deleža kritičnega dušenja za stanja uporabe (»for serviceability conditions«), ki znaša za konstrukcije nateznega traku 1 %. Po [SIST EN 1998-1:2004, 2004] se za gradbene konstrukcije običajno privzame vrednost deleža kritičnega dušenja 5 %. Dinamične analize smo zato izvedli z upoštevanjem deleža kritičnega dušenja 1 % in 5 % ter z vsemi vmesnimi vrednostmi z intervalom 1 %. Pri tem konstrukcija ni bila izpostavljena prej obravnavanim temperaturnim spremembam. Na slikah 15, 16 in 17 predstavljamo rezultate vpliva dušenja na pospeške brvi zaradi tokov pešcev.

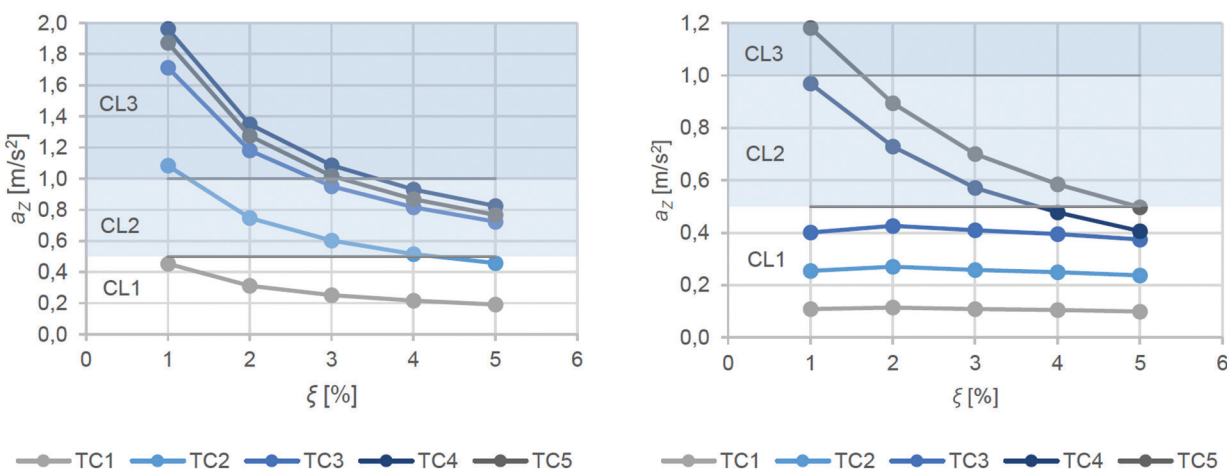
V večini primerov se z naraščanjem deleža kritičnega dušenja tako prečni kot vertikalni pospeški nateznega traku zmanjšujejo. Izstopajo krivulje pospeškov, povzročenih s harmoničnim obtežnim modelom za tokove pešcev nižjih gostot (TC1-TC3), ki izkazujejo zelo majhne spremembe zaradi upoštevanja različnih deležev kritičnega dušenja (glej slike 15.b, 16.b, 17.b). Razlog je v določitvi velikosti amplitude harmonične obtežbe pešcev nižjih gostot, saj je ta odvisna tudi od deleža kritičnega dušenja, zato se z zmanjševanjem dušenja zmanjšuje tudi obtežba, ki povzroči zmanjšan odziv. Ta fenomen v smernici [Heinemeyer, 2009] ni neposredno pojasnjen, razen tega, da so bile enačbe ugotovljene na podlagi simulacij. Z uporabo spektralne metode se lahko udobje pešcev, zaradi upoštevanja različnega deleža kritičnega dušenja, spremeni tudi za do dva razreda, s harmoničnim obtežnim modelom za gostejše tokove pešcev pa za največ enega. Pri harmoničnem obtežnem modelu za tokove pešcev z nižjo gostoto sprememba dušenja na udobje pešcev ne vpliva.



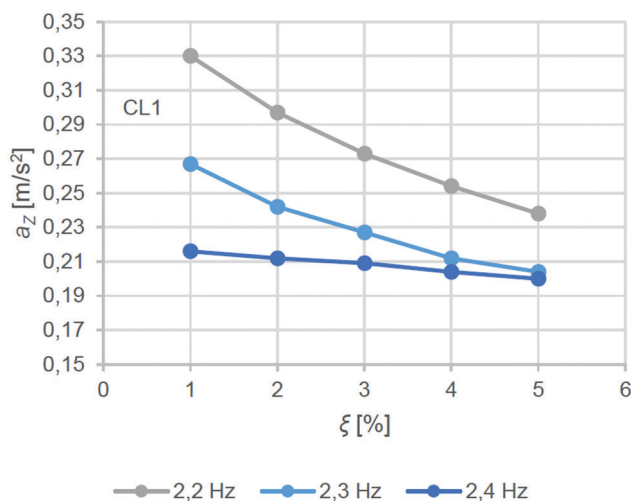
Slika 15. Prečni pospeški v odvisnosti od deleža kritičnega dušenja za 3. nihajno obliko – tok pešcev (spektralna metoda levo in časovno odvisna analiza desno)



Slika 16. Vertikalni pospeški v odvisnosti od deleža kritičnega dušenja za 4. nihajno obliko – tok pešcev (spektralna metoda levo in časovno odvisna analiza desno)



Slika 17. Vertikalni pospeški v odvisnosti od deleža kritičnega dušenja za 6. nihajno obliko – tok pešcev (spektralna metoda levo in časovno odvisna analiza desno)



Slika 18. Vertikalni pospeški zaradi skupine tekačev v odvisnosti od deleža kritičnega dušenja

Slika 18 prikazuje rezultate vzbujanja brvi z obtežbo tekačev, kjer se z višanjem deleža kritičnega dušenja vertikalni pospeški zmanjšujejo, pri čemer je to najizrazitejše pri frekvenci teka, ki je najbližja lastni frekvenci brvi. Iz navedenega lahko povzamemo, da se občutljivost vibracij brvi na spremembo deleža kritičnega dušenja povečuje s približevanjem frekvence vzbujanja lastnim frekvencam brvi. Razred udobja tekačev se kljub spremembi dušenja ne spreminja.

6 SKLEP

V prispevku smo predstavili analize vpliva temperaturnih sprememb in dušenja na vibracije brvi z nosilnim sistemom nateznega traku. Pri tem smo obravnavali konkretno mostno konstrukcijo, ki je zgrajena preko reke Krke v Irči vasi.

Raziskave so pokazale, da lahko temperaturne spremembe in dušenje pomembno vplivajo na vibracije in udobje uporabnikov brvi v Irči vasi. Ugotavljamo tudi, da na računski dinamični odziv nateznega traku v veliki meri vplivajo tudi uporabljeni

obtežni modeli ter metode dinamičnih izračunov. Spektralna metoda, ki bi jo sicer lahko uvrstili med enostavnejše metode za dinamične analize mostov za pešce, se je zaradi svoje konservativnosti izkazala kot manj primerna v primerjavi z zahtevnejšo, časovno odvisno analizo.

Temperaturne spremembe pomembno vplivajo na togost konstrukcije in posledično na lastne frekvence brvi, kar se neposredno odraža v spremembah prečnih in vertikalnih pospeškov nateznega traku. Spremembe lastnih frekvenc so lahko tudi tolikšne, da se uvrstijo v kritična območja lastnih frekvenc, zaradi česar je treba izvesti dodatne računske dokaze udobja uporabnikov brvi. Pri ugotavljanju vpliva temperature na udobje uporabnikov velja tudi poudariti, da je največje spremembe razredov udobja uporabnikov mogoče zaznati pri ekstremnih temperaturnih spremembah, pri katerih pa ni realno pričakovati, da bi bila brv dejansko v uporabi. Zaradi navedenega je mogoče oceniti vpliv ekstremnih temperaturnih sprememb na udobje uporabnikov kot precej zanemarljiv.

Vpliv dušenja na vibracije brvi je v splošnem tak, da z njegovim naraščanjem pospeški padajo, pri čemer je ta vpliv izrazitejši pri gostejših tokovih pešcev in pri obtežbi s tekači, ki konstrukcijo vzbujajo s frekvenco, podobno lastnim frekvencam brvi. Prav tako ima dušenje večji vpliv na udobje uporabnikov pri gostejših tokovih, medtem ko na udobje tekačev ne vpliva bistveno.

Na podlagi rezultatov izvedenih analiz lahko zaključimo, da sta temperatura in dušenje ključna parametra pri oceni vibracij in udobja uporabnikov brvi z nosilnim sistemom nateznega traku. Pri načrtovanju tovrstnih konstrukcij je zato smiselno kontrolno vibracij in razredov udobja izvesti za različne pričakovane temperaturne pogoje. Ker je velikost dušenja konstrukcije težko zanesljivo določiti vnaprej, je priporočljivo kontrole izvesti tudi ob upoštevanju različnih deležev kritičnega dušenja, ki jih je smiselno kasneje preveriti z meritvami na izvedeni konstrukciji.

7 LITERATURA

Agencija Republike Slovenije za okolje, Arhiv – opazovani in merjeni meteorološki podatki po Sloveniji, <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/>, 2024.

Bachmann, H., J. Ammann, W., Delschl, F., Eisenmann, J., Floegl, I., H. Hirsch, G., K. Klein, G., J. Lande, G., Mahrenholtz, O., G. Natke, H., Nussbaumer, H., J. Prftlove, A., H. Rainer, J., Saemann, E. U., Stfinbelsser, L., *Vibration Problems in Structures. Practical guidelines*, Birkhäuser Verlag, 1995. DOI: 10.1007/978-3-0348-9231-5

Chopra, A. K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. 5th ed., Pearson, 2020.

Heinemeyer, C., Butz, C., Keil, A., Schlaich, M., Goldack, A., Trometer, S., Lukić, M., Chabrolin, B., Lemaire, A., Martin, P. O., Cunha, Á., Caetano, E., *Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations*, European Commission, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen, 2009. DOI: 10.2788/33846

Hilber, H. M., Hughes, T. J. R., & Taylor, R. L., Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 5(3), 283-292, <https://doi.org/10.1002/eqe.4290050306>, 1977.

Inženirski biro Ponting, Most za pešce in kolesarje Irča vas, <https://www.ponting.si/si/projekti/most-za-pesce-in-kolesarje-irca-vas-92.html>, 2025.

Kogovšek, E., *Analiza toplotnih vplivov okolja na mostove grajene po tehnologiji nateznih trakov*. Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2024.

Likar, I., Malnar, D., Maraž, M., *Izvedba brvi za kolesarje in pešce čez Krko v Irči vasi*. Zbornik 44. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, Bled, 26.-27. oktober 2023, str. 61-72, 2023.

SIST EN 1991-1-5:2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-5. del: Splošni vplivi – Toplotni vplivi, Evropski komite za standardizacijo, 2004.

SIST EN 1991-1-5:2004/A101:2009. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-5. del: Splošni vplivi – Toplotni vplivi – Nacionalni dodatek, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2009.

SIST EN 1998-1:2005. Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, Evropski komite za standardizacijo, 2005.

SOFISTIK AG. (2024). SOFISTIK – Analysis and design software for structural engineering (Version 2024).

Stopar, M., *Vpliv temperature in dušenja na vibracije brvi z nosilnim sistemom nateznega traku zaradi dinamične obtežbe pešcev*. Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2025.

Strasky, J., *Stress Ribbon and Cable-supported Pedestrian Bridges*. Second edition, ICE Publishing, 2011.

Štrukelj, A., Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo, Poročilo o obremenilni preizkušnji brvi za pešce in kolesarje – Irča vas, Poročilo, CGP d. d., N-NN 22.00744, 2023.

Weingerl, T., Pipenbaher, M., Gotovčević, T., Filipič, A., *Prvi most, grajen po tehnologiji nateznega traku v Sloveniji*, *Gradbeni vestnik*, 72, september 2023, str. 206-216, 2023.



asist. Anamarija Poll, mag. inž. prom.
anamarija.poll@um.si



red. prof. dr. Tomaž Tollazzi, univ. dipl. inž. grad.
tomaz.tollazzi@um.si



doc. dr. Chiara Gruden, dott. mag., Republika Italija
chiara.gruden1@um.si
Univerza v Mariboru,
Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo,
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor



Znanstveni članek
UDK/UDC: 614.86-053.9

INTEGRACIJA PODATKOV O PROMETNIH NESREČAH, SIMULATORJA VOŽNJE IN OČAL ZA SLEDENJE POGLEDA ZA ANALIZO VEDENJA SLOVENSkih STAREJŠIH VOZNIKOV V PROMETU

INTEGRATION OF TRAFFIC ACCIDENT, DRIVING SIMULATOR AND EYE-TRACKING DATA TO STUDY THE DRIVING BEHAVIOUR OF ELDERLY SLOVENIAN DRIVERS

Povzetek

Prometna varnost starejših voznikov je pomembno področje, ki postaja vse bolj izrazito zaradi naraščajočega deleža starejšega prebivalstva in s tem povezanih sprememb v zaznavanju, odločanju ter odzivanju v prometu. Prispevek temelji na izsledkih magistrskega dela Problematika varnosti starejših voznikov motornih vozil v prometu, v okviru katerega je bila izvedena celovita analiza vedenja starejših voznikov osebnih vozil. Namen prispevka je analizirati značilnosti prometnih nesreč starejših voznikov ter preučiti vpliv infrastrukturnih dejavnikov in vedenjskih vzorcev na njihovo varnost. Raziskava temelji na kombinaciji analize prometnih nesreč starejših voznikov in eksperimentalnega dela, ki vključuje anketiranje udeležencev ter vožnjo v simulatorju skupaj z uporabo očal za sledenje pogleda, pri čemer so starejši vozniki primerjani z drugimi starostnimi skupinami, kar omogoča celostno obravnavo vedenja voznikov. Rezultati kažejo, da imajo starejši vozniki specifične omejitve pri zaznavanju in obdelavi informacij, kar je treba upoštevati in sistematično vključevati pri načrtovanju prometne infrastrukture in prometno-varnostnih ukrepov.

Ključne besede: starejši vozniki, prometna varnost, cestna infrastruktura, analiza prometnih nesreč, simulator vožnje, očala za sledenje pogleda

Summary

Traffic safety of elderly drivers is an important field that is becoming increasingly prominent due to the growing proportion of the ageing population and the associated decreases in perception, decision-making and response in traffic. The article is based on the findings of the first author's master thesis "The road safety problem of elderly drivers", within which a comprehensive analysis of the behaviour of elderly passenger car drivers was conducted. The aim of the article is to analyse the characteristics of traffic accidents involving elderly drivers and to examine the influence of infrastructural factors and behavioural patterns on their safety. The research is based on a combination of traffic accident analysis and an experimental study, which includes a participant survey and a driving simulator trial using also eye-tracking glasses, where elderly drivers are compared with other age groups, enabling a comprehensive assessment of driver behaviour. The results indicate that elderly drivers have specific limitations in perception and information processing, which should be considered and systematically incorporated into the design of traffic infrastructure and road safety measures.

Key words: elderly drivers, road safety, road infrastructure, traffic accident analysis, driving simulator, eye-tracking glasses

1 UVOD

Uporaba osebnega avtomobila pogosto pomeni simbol svobode, neodvisnosti in vključenosti v sodobno mobilno družbo [Mouratidis, 2025], [Urry, 2004]. To še posebno velja za starejše posameznike, katerim uporaba osebnega vozila omogoča ohranjanje samostojnosti, nadzor nad časom in večjo kakovost življenja [Davey, 2006]. Leta 2023 so samo prebivalci Slovenije na domačem in tujem cestnem omrežju z osebnimi avtomobili, registriranimi v Sloveniji, opravili 26,139 mio. pkm, kar dodatno potrjuje visoko stopnjo odvisnosti od avtomobilске mobilnosti [Statistični urad Republike Slovenije, 2026]. Vendar pa visoka stopnja avtomobilске mobilnosti poleg številnih prednosti prinaša tudi negativne posledice, predvsem v obliki prometnih nesreč, kar je pomemben družbeni in varnostni problem. Poškodbe v prometu povzročajo znatne gospodarske izgube posameznikom, njihovim družinam in družbi kot celoti, predvsem zaradi stroškov zdravljenja ter izgubljene produktivnosti. Po podatkih Svetovne zdravstvene organizacije [World Health Organization, 2023] prometne nesreče države v povprečju stanejo približno 3 % bruto domačega proizvoda, medtem ko Evropska komisija [European Commission, 2026] ocenjuje, da socialni in ekonomski stroški prometnih nesreč v državah EU dosegajo približno 2 % BDP.

Z namenom zmanjšanja teh posledic številne države sledijo konceptu Vizije NiČ [Vision Zero Network, 2026], katerega cilj je odprava smrtnih žrtev in hudih poškodb v prometu. Ta pristop temelji na spoznanju, da so človeške napake neizogibne, zato mora biti prometni sistem zasnovan tako, da te napake ne vodijo v najhujše posledice, pri čemer je ključno tudi prilagajanje prometnega sistema različnim skupinam udeležencev [Kim, 2017]. Med njimi so čedalje bolj pomembni starejši vozniki, saj se zaradi naraščajočega deleža starejšega prebivalstva povečuje tudi njihova prisotnost v prometu. V Sloveniji se pomen njihove varnosti prepoznava tudi skozi Resolucijo o nacionalnem programu varnosti cestnega prometa za obdobje od leta 2023 do 2030 (ReNPVCP23-30) [Služba Vlade Republike Slovenije za zakonodajo, 2026], kjer so starejši vozniki opredeljeni kot ena pomembnejših ranljivih skupin v cestnem prometu, ter skozi različne preventivne programe in aktivnosti, kot so Senior (AMZS Center varne vožnje) [AMZS, 2026], Osvežitvena vožnja (Zavarovalnica Triglav v sodelovanju z AMZS) [Zavarovalnica Triglav, 2025] ter projekt Sožitje za večjo varnost v cestnem prometu (Javna agencija RS za varnost prometa) [Javna agencija Republike Slovenije za varnost prometa, 2026a], ki so usmerjeni v ohranjanje mobilnosti ter izboljšanje varnosti starejših voznikov.

Starejši vozniki se kot posebna skupina udeležencev v prometu soočajo s številnimi spremembami, povezanimi s procesom staranja, ki lahko vplivajo na varnost njihove vožnje. Proces staranja je povezan z upadom vidnih, kognitivnih in psihomotoričnih sposobnosti, ki so ključne za varno upravljanje vozila [Dobbs, 2005], [Lococo, 2018]. Med pomembnejšimi dejavniki so zmanjšana vidna funkcija, počasnejše procesiranje informacij ter zmanjšana gibljivost, kar lahko vpliva na zaznavanje prometnega okolja in pravočasno odzivanje [Polders, 2015], [Falkenstein, 2020], [Kim, 2023]. Raziskave kažejo [Rimmö, 2002], [Devlin, 2014], [Polders, 2015], da starejši vozniki pogosto prilagajajo svoje vedenje, npr. z izbiro enostavnejših poti, nižjimi hitrostmi ter izogibanjem zahtevnejšim prometnim situacijam. Kljub temu analize prometnih nesreč po svetu ka-

žejo, da se povečano tveganje pri tej skupini izraža predvsem v kompleksnih prometnih okoljih, kot so križišča, vključevanje v promet ter vožnja po cestah brez fizične ločitve smernih vozišč [Chin, 2018], [Cicchino, 2015b]. Pomembno je poudariti, da tveganje ni povezano zgolj s starostjo, temveč predvsem z interakcijo med starostnimi spremembami in zahtevnostjo prometnega okolja. Problematika starejših voznikov je bila obravnavana tudi v nekaterih slovenskih zaključnih delih in evropskih projektih, ki so se osredotočali predvsem na vpliv staranja na vozniške sposobnosti, mobilnost starejših ter njihovo vključevanje v prometno okolje [Kecman, 2023], [Gerbec, 2013], [SAFE MOVE, 2016].

V tem kontekstu se prispevek osredotoča na podrobnejši vpogled v prometno varnost starejših voznikov osebnih vozil v Sloveniji. Motiv raziskave izhaja iz povečanega staranja prebivalstva ter posledično vse večjega deleža starejših voznikov v cestnem prometu, kar kliče k celovitejši obravnavi starejših voznikov v Sloveniji. Zanimanje za to področje dokazujejo že obstoječe raziskave [Kecman, 2023], [Gerbec, 2013], ki večinoma ne vključujejo hkratne primerjave različnih starostnih skupin z uporabo analize prometnih nesreč, eksperimenta s simulatorjem vožnje in z očali za sledenje pogleda ter anketne raziskave.

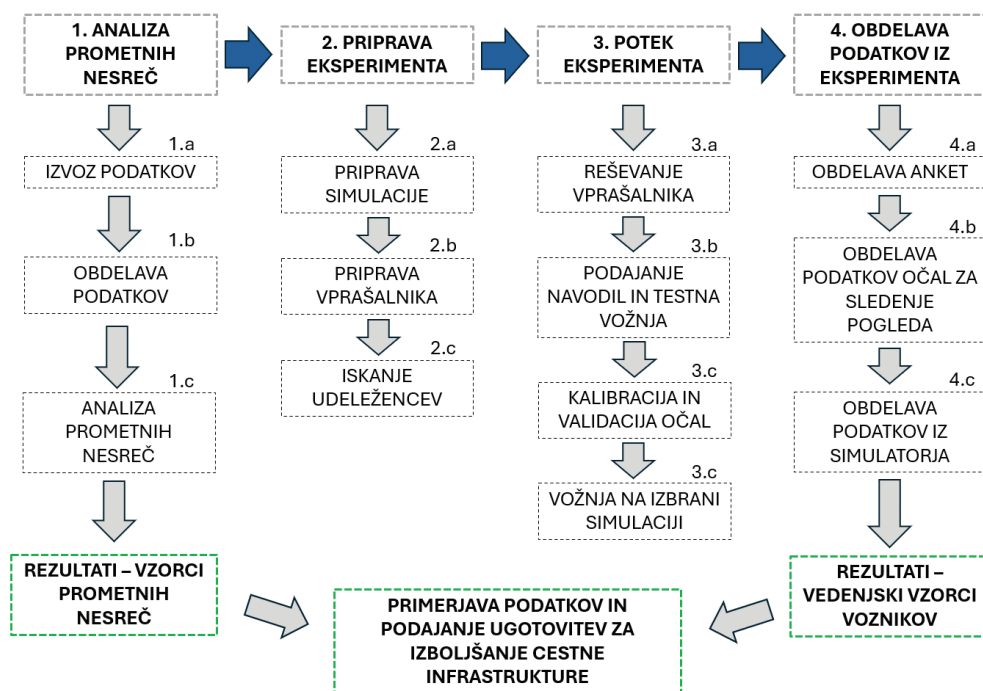
Obravnava temelji na analizi prometnih nesreč ter primerjavi vedenja starejših in mlajših voznikov z namenom prepoznavanja ključnih dejavnikov tveganja in značilnih težav, s katerimi se starejši vozniki soočajo v prometu. Ugotovitve predstavljajo podlago za oblikovanje predlogov za izboljšanje prometne varnosti te skupine voznikov.

Cilj raziskave je bil analizirati vpliv starosti na zaznavanje prometnega okolja, vedenje voznikov in reakcijski čas med vožnjo. Raziskava temelji na kombinaciji analize prometnih nesreč, eksperimenta v simulatorju vožnje z uporabo očal za sledenje pogleda ter anketne raziskave. Na podlagi pregleda literature in predhodnih raziskav so bile oblikovane naslednje hipoteze: H1: Delež starejših voznikov povzročiteljev v prometnih nesrečah se z naraščajočo starostjo povečuje; H2: Starejši vozniki imajo daljši reakcijski čas v primerjavi z mlajšimi vozniki; H3: Križišča predstavljajo za starejše voznike eno izmed prometno najzahtevnejših okolij.

2 METODOLOGIJA

Za celostno obravnavo prometne varnosti je treba uporabljati pristope, ki združujejo analizo dejanskih prometnih dogodkov z eksperimentalnimi metodami preučevanje vedenja voznikov. Takšen pristop, ki je bil uporabljen v tej raziskavi, omogoča celostno obravnavo prometne varnosti starejših voznikov, saj združuje analizo dejanskih prometnih dogodkov z opazovanjem vedenja voznikov. Metodološki pristop raziskave temelji na ugotovitvah in pristopih tujih raziskav s področja prometne varnosti starejših voznikov [Kuniyoshi, 2021], [Cicchino, 2015b], [Karali, 2016] ter je bil prilagojen obravnavanemu raziskovalnemu problemu in razpoložljivim podatkom v Sloveniji. Potek raziskave je shematsko prikazan na Sliki 1. Prikazuje potek od začetne analize prometnih nesreč do končne obdelave podatkov in interpretacije rezultatov.

Raziskava se je začela z analizo prometnih nesreč, v okviru katere je bil izveden izvoz relevantnih podatkov (1.a) iz baze



Slika 1. Metodološki pristop k raziskavi

prometnih nesreč Javne agencije Republike Slovenije za varnost prometa [Javna agencija Republike Slovenije za varnost prometa, 2026b]. Sledila je obdelava podatkov (1.b) in analiza (1.c), ki je omogočila identifikacijo ključnih značilnosti prometnih nesreč, v katerih so bili udeleženi starejši vozniki, ter določitev tipičnih prometnih situacij za nadaljnjo obravnavo. Poseben poudarek je bil namenjen prepoznavanju prometnih okolij in infrastrukturnih značilnosti, kjer so starejši vozniki pogostejše povzročitelji prometnih nesreč.

Na podlagi ugotovitev analize je bila izvedena priprava eksperimenta, ki je vključevala pripravo simulacijskega okolja (2.a), oblikovanje vprašalnika (2.b) ter iskanje in izbor udeležencev (2.c). Scenariji simulirane vožnje so bili oblikovani na podlagi ugotovitev analize prometnih nesreč, pri čemer je bil poudarek na vključevanju prometnih situacij in infrastrukturnih elementov, ki se pogosto pojavljajo pri prometnih nesrečah starejših voznikov. Poseben poudarek je bil na zagotavljanju primerljivosti med različnimi starostnimi skupinami voznikov.

Sledil je eksperiment. Udeleženci so najprej izpolnili vprašalnik (3.a), nato so prejeli navodila in opravili testno vožnjo za seznanitev s simulatorjem (3.b). Pred začetkom meritev je bila izvedena kalibracija in validacija očal za sledenje pogleda (3.c), s čimer je bila zagotovljena ustrezna kakovost zajema podatkov. Nato so udeleženci opravili vožnjo v izbranem simulacijskem okolju (3.d).

Po zaključku eksperimentalnega dela je sledila obdelava zbranih podatkov, ki je vključevala ločeno obdelavo anketnih podatkov (4.a), podatkov očal za sledenje pogleda (4.b) ter podatkov iz simulatorja vožnje (4.c). Na podlagi združenih rezultatov analize prometnih nesreč in eksperimentalnega dela so bili oblikovani ključni rezultati raziskave.

2.1 Analiza prometnih nesreč

Za potrebe raziskave so bili uporabljeni podatki o prometnih nesrečah v Sloveniji, pridobljeni iz baze prometnih nesreč Javne agencije Republike Slovenije za varnost prometa [Javna agencija Republike Slovenije za varnost prometa, 2026b]. Podatkovna baza vključuje geolocirane podatke o prometnih nesrečah ter združuje informacije različnih institucij, kot so policija, Geodetska uprava Republike Slovenije (GURS) in Direkcija Republike Slovenije za infrastrukturo. Podatki so dostopni v strukturirani obliki in omogočajo filtriranje glede na časovne, prostorske, infrastrukturne ter prometne značilnosti [Javna agencija Republike Slovenije za varnost prometa, 2026b]. Podatki so bili izvoženi iz podatkovne baze, nato pa obdelani in analizirani v programu Microsoft Excel.

Analiza je bila izvedena za obdobje enajstih let (2012–2022) in je zajemala prometne nesreče, v katerih so bili udeleženi vozniki osebnih vozil. V prvem delu analize je bila obravnavana celotna populacija voznikov, s poudarkom na deležu starejših voznikov ter njihovi udeležbi v prometnih nesrečah. V drugem delu analize pa je bila posebna pozornost namenjena prometnim nesrečam, ki so jih povzročili starejši vozniki osebnih vozil. Analizirani so bili različni dejavniki, ki vplivajo na nastanek prometnih nesreč, med drugim časovni vidik, vremenske razmere, lokacija, tip prometne nesreče, stanje prometa ter prisotnost alkohola, z namenom prepoznavanja značilnih vzorcev prometnih nesreč starejših voznikov ter primerjave njihovih značilnosti glede na različne prometne, časovne in infrastrukturne dejavnike. Namen analize je bil prepoznati značilne vzorce in okoliščine, v katerih se prometne nesreče starejših voznikov najpogosteje pojavljajo. Rezultati analize so služili kot podlaga za nadaljnji eksperimentalni del raziskave ter za identifikacijo ključnih prometnih situacij, relevantnih za preučevanje vedenja voznikov. Za namen tega

prispevka so v nadaljevanju predstavljeni podatki, ki so ključnega pomena za razumevanje vedenja starejših voznikov in same infrastrukture.

2.2 Eksperimentalni del

Eksperimentalni del raziskave je bil izveden v laboratoriju za prometno inženirstvo na Fakulteti za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo (v nadaljevanju FGPA) Univerze v Mariboru. Namen eksperimenta je bil preučiti vedenje voznikov različnih starostnih skupin, s poudarkom na starejših voznikih, v nadzorovanem simulacijskem okolju. Eksperiment je bil izveden s simulatorjem vožnje osebnega vozila, ki omogoča simulacijo različnih prometnih situacij v virtualnem prometnem okolju. Simulacijsko okolje je bilo prilagojeno potrebam raziskave ter zasnovano tako, da omogoča varno in ponovljivo izvedbo eksperimenta za vse udeležence. V raziskavi so bili uporabljeni simulator vožnje in očala za sledenje pogleda (angl. eye-tracking glasses), ki omogočajo natančno spremljanje vedenja voznika ter njegovega vizualnega zaznavanja prometnega okolja. Simulator vožnje omogoča ponovitev enakih prometnih situacij za vse udeležence, s čimer se zagotovi primerljivost rezultatov in izogne vplivu nepredvidljivih dejavnikov, značilnih za realno prometno okolje. Slika 2 prikazuje uporabo simulatorja vožnje in očal za sledenje pogleda med izvedbo eksperimenta.

Eksperimenta se je udeležilo 30 prostovoljcev, razdeljenih v tri starostne skupine: mladi odrasli (25–44 let), srednje odrasli (45–65 let) in starejši (65 let in več). Vsako skupino je sestavljalo deset udeležencev, enakomerno porazdeljenih glede na spol. Vsi udeleženci so imeli veljavno vozniško dovoljenje kategorije B. Pri izboru udeležencev so bile upoštevane določene omejitve, predvsem glede ustreznega vida, saj bi uporaba korekcijskih očal ali prisotnost očesnih bolezni lahko vpliva na kakovost zajema podatkov z očali za sledenje pogleda. Velikost vzorca je bila prilagojena eksperimentalni naravi raziskave ter zahtevnosti izvedbe vožnje simulatorja in meritev z očali za sledenje pogleda. Podobno manjši vzorci udeležencev so pogosto uporabljeni tudi v primerljivih eksperimentalnih raziskavah s področja prometne varnosti in eye-tracking analiz voznikov [Kuniyoshi, 2021], [Le, 2020], [Rumschlag, 2015], [Davenne, 2012].

Eksperiment je bil izveden v več zaporednih fazah. Najprej so udeleženci izpolnili anketni vprašalnik, s katerim so bili zbrani podatki o njihovih voznških navadah, izkušnjah in poznavanju cestnoprometnih predpisov. Po izpolnjevanju vprašalnika so

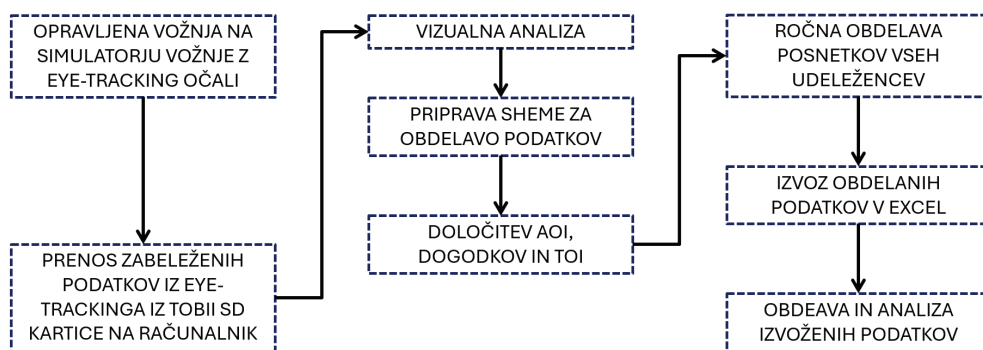


Slika 2. Uporaba simulatorja v eksperimentu

udeleženci prejeli navodila za uporabo simulatorja vožnje ter očal za sledenje pogleda. Pred začetkom meritev je bila izvedena testna vožnja, namenjena seznanitvi z delovanjem simulatorja. Sledili sta namestitvev očal za sledenje pogleda ter izvedba kalibracije in validacije, s čimer je bila zagotovljena ustrežna natančnost meritev. Po uspešno izvedeni kalibraciji so udeleženci opravili vožnjo v vnaprej pripravljenem simulacijskem scenariju. Simulacija je trajala približno šest minut in je vključevala več prometnih situacij, kot so vožnja skozi naselje, semaforizirana križišča, prisotnost pešcev ter nepričakovani odvzemi prednosti. Poseben poudarek je bil na kritičnih situacijah, ki zahtevajo hitro zaznavanje in pravočasno reakcijo voznika.

Med vožnjo so bili zajeti podatki o vedenju voznika, njegovih reakcijah ter vizualnem zaznavanju prometnega okolja, ki so bili kasneje uporabljeni za nadaljnjo analizo.

Zbrani podatki so bili obdelani z namenom primerjave vedenja voznikov različnih starostnih skupin ter identifikacije ključnih dejavnikov, ki vplivajo na prometno varnost starejših voznikov. Podatki iz anketnega vprašalnika so bili najprej pregledani in urejeni ter nato analizirani z uporabo osnovnih opisnih statističnih metod. Rezultati so omogočili vpogled v voznške navade, izkušnje in samooceno voznikov.



Slika 3. Potek obdelave podatkov iz očal za sledenje pogleda

Podatki iz simulatorja vožnje so vključevali informacije o vedenju voznika med vožnjo, kot so hitrost, uporaba pedalov, reakcijski čas ter morebitne napake pri vožnji. Ti podatki so bili analizirani z namenom ugotavljanja razlik med starostnimi skupinami in prepoznavanja kritičnih situacij.

Podatki, pridobljeni z očali za sledenje pogleda, so bili obdelani v več zaporednih korakih, ki so shematsko prikazani na Sliki 3. Postopek je vključeval prenos posnetkov, vizualno analizo, pripravo sheme za obdelovanje podatkov, določitev območij interesa – AOI (angl. Area of Interests), dogodkov (angl. Events) in čas interesa – TOI (angl. Time of Interests), ter končno obdelavo in analizo podatkov.

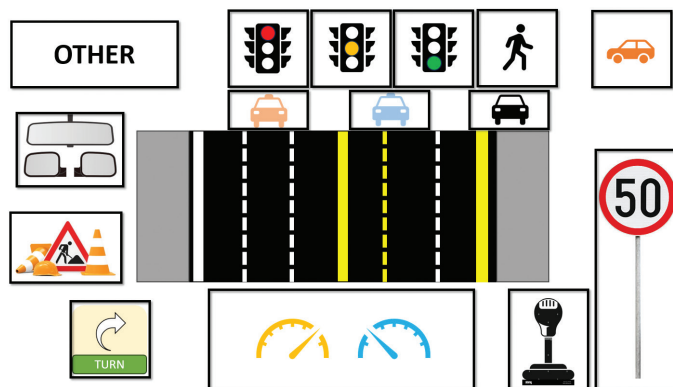
Po izvedbi eksperimenta so bili posnetki vožnje z zabeleženimi točkami pogleda oz. fiksacijami preneseni iz naprave na računalnik ter obdelani s programsko opremo Tobii Pro Lab (Tobii, 2026). V prvi fazi je bil izveden vizualni pregled posnetkov in ocena kakovosti zajetih podatkov, pri čemer so bili v analizo vključeni le posnetki z zadostnim deležem veljavnih podatkov (minimalno 75 %).

AOI, ključni elementi prometnega okolja, so prikazani na Sliki 4:

- Semafor z vsemi njegovimi barvami: ikona semaforja z rdečo, rumeno in zeleno lučjo. V celotni prevoženi situaciji se vozniki srečajo s šestimi semaforji, od teh se trije preklonijo na rdečo;
- Pešci v interakciji in izven interakcije z voznikom (ikona pešca): med vožnjo se vozniki dvakrat srečajo s pešci; prvič, ko pešci prečkajo cestišče, in drugič, ko so pešci prisotni na pločniku ob semaforju, ko v križišču vozniki zavijajo v levo;
- Avtomobili s stranske ceste (ikona oranžnega avtomobila – bočno): avtomobili, ki so na drugih prometnih smereh in s katerimi se srečajo samo v križiščih;
- Nasproti vozeči avtomobili (ikona oranžnega avtomobila – spredaj): avtomobili, ki se vozijo v enaki prometni smeri, a po nasprotnem voznem pasu. Z njimi se vozniki srečujejo konstantno;
- V isto smer vozeči avtomobili (ikona modrega avtomobila): avtomobili, ki se vozijo po levem pasu v isti smeri kot anketiranci. Vozniki se z njimi srečujejo skoraj v celotni situaciji;
- Parkirani avtomobili (ikona črnega avtomobila): avtomobili, ki so parkirani na desnem pasu enake prometne smeri. Vozniki se z njimi srečujejo skoraj v celotni situaciji;
- Oglledala (ikona ogledal): vzvratna ogledala na avtomobilu;
- Delo na cesti (ikona signalizacije za delo na cesti): delo na cesti, kjer je zaprt levi prometni pas. Vozniki se s tem srečajo le enkrat v celotni situaciji;
- Vertikalna signalizacija (ikona prometnega znaka za omejitev hitrosti): vertikalna signalizacija za omejitev hitrosti, s katero se vozniki srečajo dvakrat;
- Menjalnik (ikona menjalnika): menjalnik na simulatorju, katerega nekateri vozniki gledajo, ko menjavajo prestave;
- Merilnika hitrosti in obratov (ikoni s števcema): ločeni ikoni števcema za hitrost in obrate;
- Obvestilo z napisom »TURN« (ikona puščice): obvestilo se pojavi v situaciji, ko morajo vozniki v križišču zaviti ali levo ali desno. Vozniki se z obvestilom srečajo dvakrat, enkrat morajo zaviti desno in enkrat levo;
- Ikona »OTHER«: drugi elementi, ki niso predmet prometa oz. prometne infrastrukture, vendar jih vozniki vseeno opazujejo, npr. opazovanje okolice z naravo, stavbe ipd.;

- Cesta (ikone, ki so v grobem razdeljene na desni in levi vozni pas, ločilni otok ter na levi in desni pločnik): elementi ceste.

Na podlagi teh območij je bila pripravljena shema za nadaljnjo obdelavo podatkov. Za analizo vedenja voznikov so bili definirani tudi dogodki in TOI, ki omogočajo primerljivo obravnavo enakih prometnih situacij pri vseh udeležencih. S tem je bila zagotovljena ponovljivost in primerljivost rezultatov.



Slika 4. Določitev AOI

Sledila je ročna obdelava posnetkov, pri kateri so bile posamezne fiksacije povezane z vnaprej določenimi območji interesa. Na podlagi tega so bili pridobljeni ključni kazalniki vizualnega zaznavanja, kot so:

- število fiksacij (FC),
- povprečno trajanje fiksacije (AFD),
- skupno trajanje fiksacije (TFD),
- trajanje prve fiksacije (FFD).

Za potrebe tega prispevka so bili izpostavljeni predvsem podatki o številu fiksacij, trajanju prve fiksacije in o povprečju trajanja fiksacij. Ti podatki omogočajo neposredno povezavo med vizualnim zaznavanjem in značilnostmi prometne infrastrukture.

Poleg tega je bil za izbrane prometne dogodke določen reakcijski čas, opredeljen kot časovni zamik med pojavom elementa v simulaciji in prvo zaznano fiksacijo nanj. Na koncu so bili obdelani podatki izvoženi v pregledni obliki in uporabljeni za nadaljnjo analizo vedenja voznikov. Pri analizi je bilo upoštevano tudi dejstvo, da očala za slednje pogleda zaznavajo le neposredne fiksacije, medtem ko zaznavanje s perifernim vidom ni zajeto. Rezultati analize prometnih nesreč in eksperimentalnega dela so bili na koncu združeni ter interpretirani z namenom celostnega razumevanja prometne varnosti starejših voznikov.

3 REZULTATI

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati analize prometnih nesreč ter eksperimentalnega dela raziskave. Rezultati eksperimenta vključujejo ugotovitve anketnega vprašalnika in analizo vedenja voznikov v simulatorju vožnje z uporabo očal za sledenje pogleda.

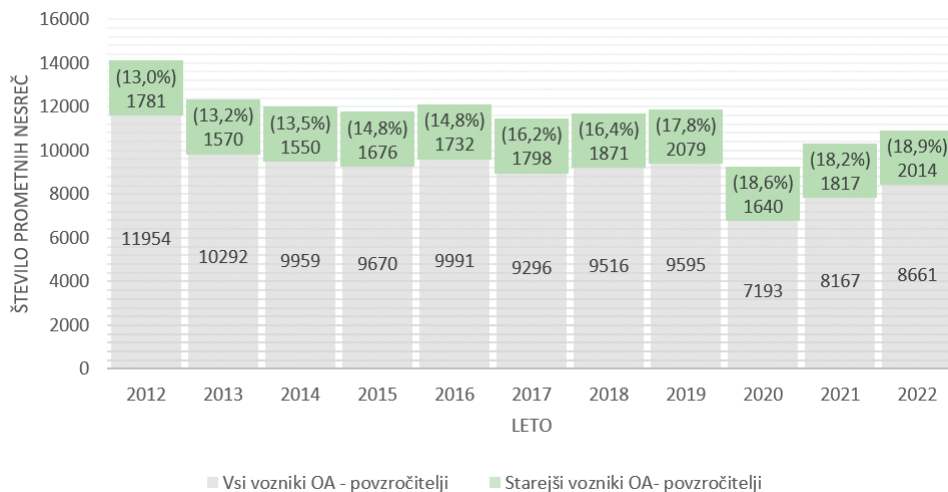
3.1 Analiza prometnih nesreč

Analiza je temeljila na enajstletnem obdobju prometnih nesreč, ki so jih povzročili vozniki osebnih vozil. Slika 5 prikazuje število teh prometnih nesreč. Stolpci prikazujejo število prometnih nesreč po letih, starejši povzročitelji prometnih nesreč pa so dodatno ločeni in prikazani z zeleno barvo in odstotki. Kljub splošnemu upadu števila prometnih nesreč skozi leta opazimo, da se delež starejših voznikov povzročiteljev povečuje. Medtem ko je delež starejših voznikov leta 2012 znašal 13,8 %, se je do leta 2022 povečal na približno 19 %. To kaže na naraščajočo vlogo starejših voznikov v strukturi prometnih nesreč.

zvit trend naraščanja je prisoten tudi pri prometnih nesrečah s hudimi telesnimi poškodbami, medtem ko so deleži pri lažjih poškodbah in nesrečah brez poškodb bolj stabilni, vendar prav tako rahlo naraščajo.

Rezultati nakazujejo, da se s staranjem populacije povečuje delež starejših voznikov med povzročitelji prometnih nesreč, pri čemer je njihov vpliv še posebno izrazit pri prometnih nesrečah z najtežjimi posledicami.

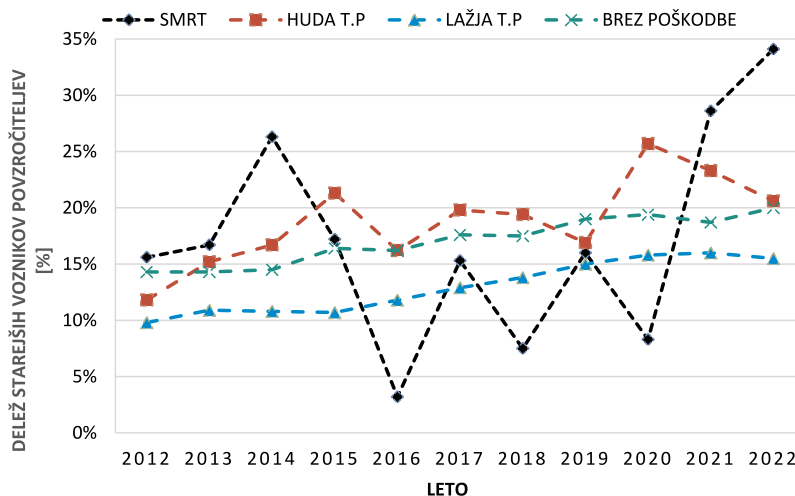
Preglednica 1 prikazuje prometne nesreče starejših voznikov povzročiteljev, ki so se zgodile v obravnavanem obdobju. Večina prometnih nesreč se je zgodila v naseljih (14682), kar je



Slika 5. Prometne nesreče od leta 2012 do 2022 glede na voznike povzročitelje

Slika 6 prikazuje delež starejših voznikov povzročiteljev prometnih nesreč glede na posledice v obdobju 2012–2022. Opaziti je mogoče splošen trend naraščanja deleža starejših voznikov pri prometnih nesrečah. Najbolj izrazit porast je viden pri prometnih nesrečah s smrtnim izidom, kjer delež v zadnjih letih presega 30 %, kar kaže na povečano ranljivost starejših voznikov v najtežjih prometnih situacijah. Podoben, vendar manj izra-

povezano z večjo prometno kompleksnostjo, večjim številom konfliktnih točk ter pogostejšimi manevri in spremembami smeri vožnje. K nastanku prometnih nesreč dodatno prispevajo številna križišča, priključki, parkirišča ter večje število različnih udeležencev v prometu, kot so pešci in kolesarji. Vendar pa se prometne nesreče s smrtnim izidom pogosteje pojavljajo zunaj naselij (66), kar lahko pripišemo višjim hitrostim vožnje.



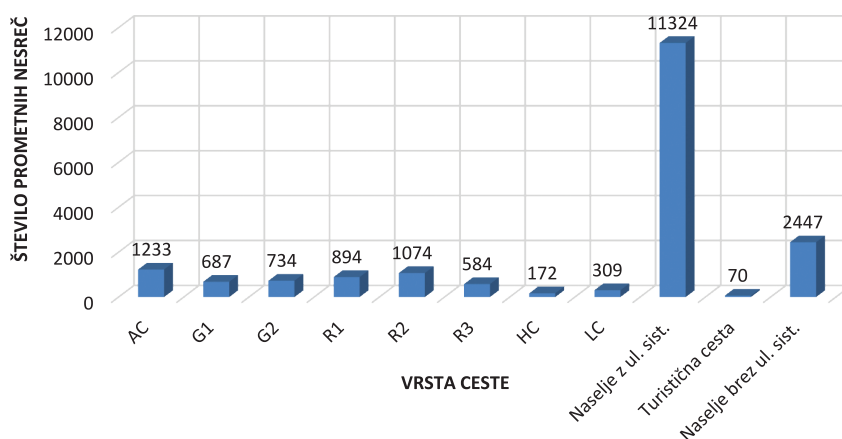
Slika 6. Prometne nesreče glede na resnost poškodb

Število prometnih nesreč	V naseljih	Zunaj naselij
Smrt	41	66
Huda telesna poškodba	382	290
Skupno	14682	4846

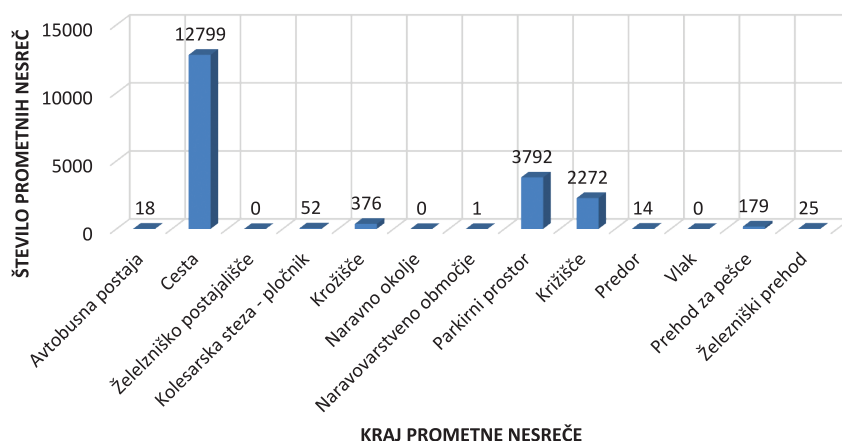
Preglednica 1. Prometne nesreče v naseljih in zunaj naselij

Sliki 7 in 8 prikazujeta dva grafa, na katerih je prikazano skupno število prometnih nesreč, ki so jih povzročili starejši vozniki v obravnavanem obdobju. Slika 7 prikazuje število prometnih nesreč glede na vrsto ceste, slika 8 pa prikazuje število prometnih nesreč glede na lokacijo prometne nesreče. Največ prometnih nesreč so starejši povzročili v naseljih z uličnim sistemom (11324), sledijo prometne nesreče v naseljih brez uličnega sistema (2447) in prometne nesreče na avtocestah (1233). Najmanj prometnih nesreč se zgodi na turističnih cestah (70) in hitrih cestah (172). Večino prometnih nesreč starejši vozniki osebnih avtomobilov povzročijo na cesti (12799), kar ne presega, saj se največji del vožnje odvija prav v tem okolju. Sledijo prometne nesreče na parkirnih prostorih (3792) in v križiščih (2272). Križišča so posebno kritične točke, saj vključujejo večje število prometnih interakcij in zahtevajo hitro zaznavanje ter pravilno odločanje voznika.

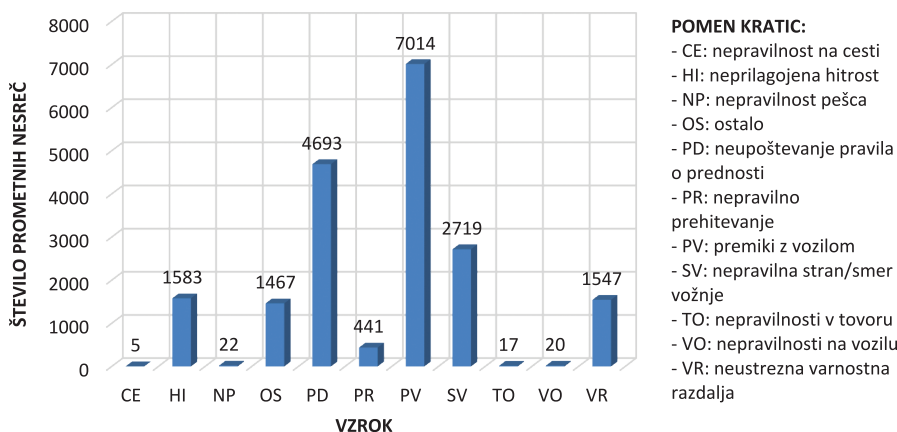
Na Sliki 9 so prikazani podatki o vzroku prometne nesreče, torej zakaj se je prometna nesreča zgodila, na Sliki 10 pa so prikazani podatki o tipu prometne nesreče. Največ prometnih nesreč so starejši vozniki povzročili zaradi premikov vozila (7014), sledijo prometne nesreče zaradi neupoštevanja pravil o prednosti (4693) in pa prometne nesreče zaradi nepravilne smeri oz. smeri vožnje (2719). Najmanj prometnih nesreč je bilo povzročenih zaradi nepravilnosti na cesti (5), zaradi nepravilnosti na tovoru (17) in zaradi nepravilnosti na vozilu (20). Največ prometnih nesreč so starejši vozniki povzročili z bočnim trčenjem (4964), sledijo prometne nesreče s trčenjem v stoječe oz. parkirano vozilo (4357) in prometne nesreče z oplazenjem (3216).



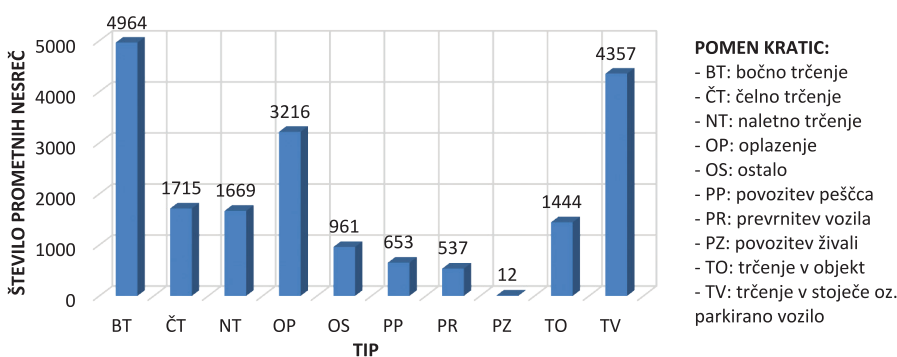
Slika 7. Število prometnih nesreč glede na vrsto ceste



Slika 8. Število prometnih nesreč glede na kraj prometne nesreče



Slika 9. Število prometnih nesreč glede na vzrok prometne nesreče



Slika 10. Število prometnih nesreč glede na tip prometne nesreče

3.2 Eksperiment

V okviru eksperimentalnega dela raziskave so bili z anketnim vprašalnikom zbrani podatki o voznških navadah, zaznavanju prometnih situacij ter poznavanju cestnoprometnih predpisov, ki so pomembni tudi z vidika načrtovanja prometne infrastrukture.

3.2.1 Rezultati ankete

V nadaljevanju so predstavljeni izbrani rezultati anketnega vprašalnika, ki so relevantni za razumevanje vedenja voznikov in njihovega zaznavanja prometne varnosti, s posebnim poudarkom na vidikih, pomembnih za načrtovanje prometne infrastrukture. Poudarek je na primerjavi med starostnimi skupinami.

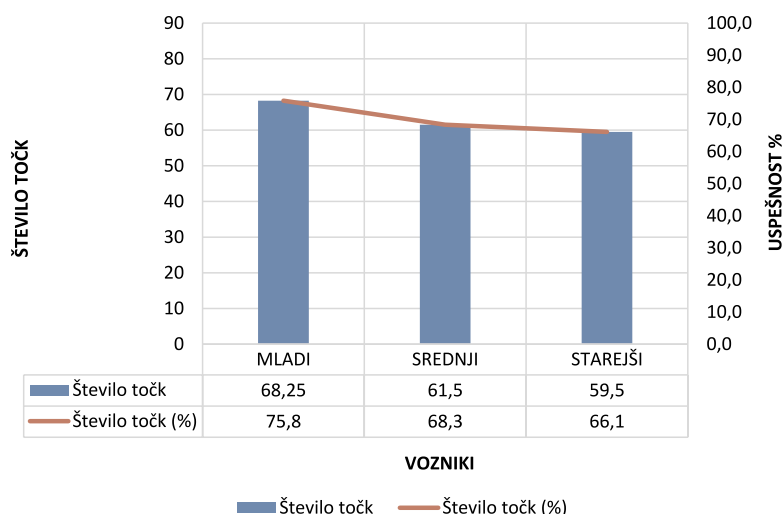
Rezultati kažejo, da starejši vozniki svojo vožnjo v splošnem ocenjujejo kot bolj umirjeno in previdno (90 %). Pogosteje navajajo počasnejšo vožnjo v naseljih (80 %) ter redkejšo prekoračitve hitrosti (30 %) v primerjavi z mlajšimi vozniki (90 %). Za razliko od starejših mlajši vozniki pogosteje poročajo o vožnji nad dovoljeno hitrostjo, predvsem zunaj naselij (90 %) in na avtocestah (70 %). Ne glede na starost pa večina anketirancev ocenjuje, da upoštevajo varnostno razdaljo (90 %) in uporabljajo smernike (80 %). Izrazitejše razlike med starostnimi skupinami pa se kažejo pri zaznavanju prometnih situacij, saj starejši vozniki pogosteje izražajo negotovost pri vožnji v neznanem okolju (70 %).

Rezultati preverjanja znanja cestnoprometnih predpisov kažejo na postopno zmanjševanje uspešnosti z naraščajočo starostjo. Najvišjo uspešnost so dosegli mlajši vozniki (75,8 %), sledijo srednje stari (68,3 %), medtem ko so starejši vozniki dosegli najnižji delež pravih odgovorov (66,1 %), kar prikazuje Slika 11. Posebej izstopajo težave pri razumevanju pravil o prednosti ter pri poznavanju aktualnih prometnih pravil, kar lahko nakazuje na vpliv zastarelega znanja in redkejši izpostavljenosti novim prometnim situacijam.

3.2.2 Rezultati vožnje s simulatorjem in uporabe očal za sledenje pogleda

Rezultati eksperimentalnega dela temeljijo na analizi vedenja voznikov v simulatorju vožnje ter podatkih, pridobljenih z očali za sledenje pogleda. Poudarek je na kazalnikih, kot so reakcijski čas, čas prve fiksacije, povprečno trajanje in število fiksacij, ki omogočajo vpogled v zaznavanje prometnega okolja in odzivanje voznikov.

Rezultati kažejo, da imajo starejši vozniki bistveno daljši reakcijski čas v primerjavi z mlajšimi in srednje starimi vozniki: v povprečju je njihov reakcijski čas daljši za približno 67 %, pri večini obravnavanih dogodkov pa so reagirali najpočasneje. Posebej izrazite razlike se pojavljajo pri zaznavanju manj izpostavljenih elementov, kot so pešci izven neposredne interakcije, kjer so starejši vozniki dosegli najdaljše reakcijske čase: 8,29 s, kar predstavlja več kot dvakrat daljši reakcijski čas v primerjavi z mlajšimi vozniki (3,68 s). Nasprotno so pri kritičnih



Slika 11. Rezultati preverjanja znanja cestnoprometnih predpisov

dogodkih (npr. odvzem prednosti) vsi vozniki reagirali hitreje, kar kaže na večjo zaznavno prioriteto nevarnih situacij. Rezultati nakazujejo, da starejši vozniki počasneje zaznavajo in obdelujejo prometne informacije, kar je posebno problematično v kompleksnih prometnih okoljih.

Analiza trajanja prve fiksacije kaže, da starejši vozniki v primerjavi z mlajšimi vozniki povprečju dlje časa usmerjajo pogled na posamezne elemente (za 75 %), kar kaže na počasnejšo obdelavo informacij. Kljub temu je zanimivo, da so pri nekaterih ključnih elementih, kot so pešci, beleženi krajši časi prve fiksacije (11 % krajši čas v primerjavi z mlajšimi vozniki), kar v kombinaciji z daljšim reakcijskim časom nakazuje na manjšo usmerjenost pozornosti na te elemente. To lahko pomeni, da starejši vozniki določenim elementom ne namenijo dovolj pozornosti, kljub temu da bi bili ti z vidika prometne varnosti ključni.

Preglednica 2 prikazuje, da starejši vozniki v povprečju pogosteje usmerjajo pogled na posamezne elemente, saj so imeli

večje število fiksacij pri več kot polovici analiziranih elementov. Največ pozornosti so vsi vozniki namenili voznemu pasu, kar je pričakovano, medtem ko starejši vozniki pogosteje spremljajo tudi vozila v okolici (43 % in 47 %) in prometno signalizacijo (npr. prometne znake – 42 %). Povečano število fiksacij pri starejših voznikih lahko kaže na večjo potrebo po preverjanju okolice, kar je lahko posledica zmanjšane samozavesti ali večje negotovosti pri vožnji.

Povprečen čas fiksacije se s starostjo povečuje, kar je razvidno iz Preglednice 3. Starejši vozniki so imeli najdaljše čase fiksacij pri večini elementov, za skoraj 50 % daljše v primerjavi z mlajšimi vozniki, kar pomeni, da posameznim informacijam namenijo več časa kot drugi. Daljši čas fiksacije kaže na počasnejšo kognitivno obdelavo informacij, kar lahko vpliva na sposobnost pravočasnega odzivanja v dinamičnih prometnih situacijah.

Skupni rezultati kažejo, da se z naraščajočo starostjo spremeni način vizualnega zaznavanja prometnega okolja. Starejši

Elementi	Mladi [št. fiksacij]	Srednji [št. fiksacij]	Starejši [št. fiksacij]	Skupaj [št. fiksacij]	Delež mladih [%]	Delež srednjih [%]	Delež starejših [%]
Vozeči avti	689	561	938	2188	31	26	43
Parkirani avti	549	367	828	1744	31	21	47
Delo na cesti	34	50	43	127	27	39	34
Levi vozni pas	54	94	95	243	22	39	39
Desni vozni pas	2869	2587	2609	8065	36	32	32
Ločilni otok	45	49	34	128	35	38	27
Menjalnik	22	18	64	104	21	17	62
Obvestilo za zavijanje	55	47	57	159	35	30	36
Ogledala	398	274	250	922	43	30	27
Ostalo	495	336	501	1332	37	25	38

Pešci	241	276	217	734	33	38	30
Pločnik levo	-	1	5	6	0	17	83
Pločnik desno	90	85	166	341	26	25	49
Semafor rdeča	244	208	292	744	33	28	39
Semafor rumena	50	56	58	164	30	34	35
Semafor zelena	315	452	682	1449	22	31	47
Števec za hitrost	482	414	203	1099	44	38	18
Števec za obrate	685	368	203	1256	55	29	16
Prometni znak	63	48	82	193	33	25	42
Skupaj	7380	6291	7327	20998	-	-	-

Preglednica 2. Število fiksacij v skupni prevoženi situaciji

Elementi	Mladi [s]	Srednji [s]	Starejši [s]
Vozeči avti	0,68	1,02	1,20
Parkirani avti	0,28	0,36	0,45
Delo na cesti	0,40	0,64	0,43
Levi vozni pas	0,29	0,53	0,49
Desni vozni pas	1,64	2,06	2,39
Ločilni otok	0,24	0,39	0,44
Menjalnik	0,09	0,08	0,11
Obvestilo za zavijanje	0,17	0,19	0,31
Ogledala	0,18	0,22	0,21
Ostalo	0,18	0,26	0,23
Pešci	0,28	0,32	0,36
Pločnik levo	-	0,01	0,06
Pločnik desno	0,25	0,25	0,30
Semafor rdeča	0,23	0,28	0,27
Semafor rumena	0,20	0,32	0,39
Semafor zelena	0,31	0,48	0,49
Števec za hitrost	0,22	0,26	0,29
Števec za obrate	0,21	0,27	0,26
Prometni znak	0,18	0,30	0,41
Skupaj:	6,04	8,22	9,07

Preglednica 3. Povprečen čas fiksacije v prevoženi simulaciji

vozniki sicer okolično preverjajo pogosteje, vendar posameznim elementom namenjajo več časa, hkrati pa ključne informacije zaznavajo z zamikom. Takšen vzorec kaže na manj učinkovito razporejanje pozornosti, kjer je zaznavanje sicer prisotno, vendar časovno manj optimalno. To lahko privede do zamud pri zaznavi pomembnih prometnih elementov, kar povečuje tveganje v situacijah, kjer je potrebna hitra in pravočasna reakcija.

Za dodatno preverjanje razlik med starostnimi skupinami je bila izvedena statistična analiza rezultatov eksperimentalnega dela. Namen analize je bil ugotoviti, ali med mladimi, srednje starimi in starejšimi vozniki obstajajo statistično značilne razlike pri reakcijskem času ter parametrih sledenja pogleda. Rezultati deskriptivne statistike, ki so prikazani v Preglednici 4, kažejo da se med starostnimi skupinami pojavljajo razlike predvsem pri reakcijskem času ter parametrih trajanja fiksacij. Starejši vozniki so v povprečju dosegli najdaljši reakcijski čas (3,25 s), medtem ko so mlajši vozniki dosegli najkrajšega (1,817 s). Prav tako smo pri starejših voznikih zaznali daljše povprečno trajanje fiksacij kot tudi daljše povprečno trajanje prve fiksacije, kar nakazuje na potrebo po daljšem zaznavanju in obdelavi prometnih informacij.

Sledilo je preverjanje normalnosti porazdelitve podatkov z Anderson-Darlingovim testom, kar je omogočilo izbiro ustreznega statističnega testa za nadaljnjo analizo razlik med starostnimi skupinami. Rezultati testa (Preglednica 5) so pokazali, da podatki ne sledijo normalni porazdelitvi (p-vrednost < 0,005), zato je bil za primerjavo med starostnimi skupinami uporabljen neparametrični Mann-Whitneyjev test. Test temelji na preverjanju razlik med medianami dveh vzorcev. Nična hipoteza testa predpostavlja, da sta mediani obravnavanih vzorcev enaki. V primeru p-vrednosti, večje od 0,05 (pri stopnji zaupanja 95 %), nične hipoteze ni mogoče zavrniti, medtem ko jo je pri nižjih p-vrednostih treba zavrniti [Chicco, 2025].

Parametri sledenja pogleda	Deskriptivna statistika	Mladi	Srednji	Starejši
Skupno število fiksacij	Povprečje	42,17	36,58	42,6
	Standardna napaka povprečja	5,43	4,73	5,2
	Najmanjša vrednost	1	1	1
	Mediana	20	14,5	16,5
	Največja vrednost	494	363	357
	Asimetrija porazdelitve	3,73	3,44	2,8
Povprečno trajanje fiksacij	Povprečje	0,3182	0,4312	0,4773
	Standardna napaka povprečja	0,0283	0,0349	0,0414
	Najmanjša vrednost	0	0	0
	Mediana	0,2066	0,0848	0,3148
	Največja vrednost	2,9727	2,5444	3,2141
	Asimetrija porazdelitve	3,78	2,68	2,78
Trajanje prve fiksacije	Povprečje	0,328	0,4657	0,4867
	Standardna napaka povprečja	0,0271	0,0519	0,0439
	Najmanjša vrednost	0	0	0
	Mediana	0,1999	0,2449	0,2548
	Največja vrednost	2,2787	6,2663	2,9483
	Asimetrija porazdelitve	2,55	4,48	2,12
Reakcijski čas	Povprečje	1,817	2,577	3,25
	Standardna napaka povprečja	0,272	0,376	0,587
	Najmanjša vrednost	0	0	0
	Mediana	0,75	0,919	1,274
	Največja vrednost	16,121	27,544	55,288
	Asimetrija porazdelitve	2,88	3,36	5,86

Preglednica 4. Deskriptivna statistika parametrov sledenja pogleda po starostnih skupinah

Skupina in parametri sledenja pogleda	Aritmetična sredina	Standardni odklon	N	Anderson-Darlingova statistika	p-vrednost
Mladi vozniki – FC	42,17	71,78	175	23,224	< 0,005
Srednje stari vozniki – FC	36,58	62,06	172	24,882	< 0,005
Starejši vozniki – FC	42,6	68,16	17	23,619	< 0,005
Mladi vozniki – AFD	0,3182	0,3888	189	24,58	< 0,005
Srednje stari vozniki – AFD	0,4312	0,4804	190	20,874	< 0,005
Starejši vozniki – AFD	0,4773	0,5705	190	22,985	< 0,005
Mladi vozniki – FFD	0,328	0,3736	190	16,287	< 0,005
Srednje stari vozniki – FFD	0,4657	0,7154	190	23,482	< 0,005
Starejši vozniki – FFD	0,4867	0,6045	190	18,236	< 0,005

Mladi vozniki – reakcijski čas	1,817	2,933	116	13,492	< 0,005
Srednje stari vozniki – reakcijski čas	2,577	4,02	114	11,606	< 0,005
Starejši vozniki – reakcijski čas	3,25	6,187	111	13,674	< 0,005

Preglednica 5. Rezultati testa normalne porazdelitve (Anderson-Darlingov test) za mlade, srednje in starejše voznike

Kot je razvidno iz Preglednice 6, rezultati Mann-Whitneyjevega testa kažejo, da pri skupnem številu fiksacij med skupinami ni statistično značilnih razlik, saj interval zaupanja vsebuje vrednost 0, p-vrednost pa je večja od 0,05. Statistično značilne razlike pa so bile ugotovljene pri povprečnem trajanju fiksacij, reakcijskem času ter trajanju prvih fiksacij. Pri tem je posebno pomembno, da so bile razlike izrazite predvsem med mladimi in starejšimi vozniki, medtem ko razlike med srednje starimi in starejšimi vozniki niso bile tako izrazite.

kov povzročiteljev povečuje, kar je mogoče povezati z demografskimi trendi staranja prebivalstva; to je bilo opaženo tudi drugod po svetu [Cicchino, 2015a], [Sagar, 2020], [Cicchino, 2015b]. Ob tem je posebno skrb vzbujajoče, da je delež starejših voznikov relativno visok pri prometnih nesrečah s hudimi telesnimi poškodbami in smrtnim izidom.

Z eksperimentom je bilo ugotovljeno, da imajo starejši vozniki daljši reakcijski čas ter potrebujejo več časa za zaznavanje in

Parametri sledenja pogleda	Primerjava med vozniki	95% interval zaupanja	p-vrednost
Skupno število fiksacij	Mladi-starejši vozniki	(-3,00; 2,99)	0,9462
	Srednje stari-starejši vozniki	(-3,99; 2,00)	0,5087
Povprečno trajanje fiksacij	Mladi-starejši vozniki	(-0,1218; -0,0526)	0
	Srednje stari-starejši vozniki	(-0,0521; 0,0223)	0,5008
Trajanje prve fiksacije	Mladi-starejši vozniki	(-0,0900; 0)	0,0437
	Srednje stari-starejši vozniki	(-0,0600; 0,0399)	0,7376
Reakcijski čas	Mladi-starejši vozniki	(-0,709; -0,020)	0,0103
	Srednje stari-starejši vozniki	(-0,495; 0,169)	0,3913

Preglednica 6. Razlike med starostnimi skupinami po Mann-Whitneyevem testu

To nakazuje, da starejši vozniki prometnega okolja ne spremljajo nujno z večjim številom pogledov, temveč posameznim elementom namenijo več časa. Daljše trajanje prve in povprečne fiksacije kaže na počasnejšo obdelavo prometnih informacij ter večjo kognitivno obremenitev med vožnjo. Hkrati daljši reakcijski čas potrjuje, da starejši vozniki potrebujejo več časa za zaznavo in odzivanje na prometne dogodke, zlasti v kompleksnejših situacijah.

Rezultati tako kažejo, da se s starostjo ne spreminja toliko količina vizualnega spremljanja okolice, temveč predvsem učinkovitost obdelave informacij in hitrost odzivanja. Ker med srednje starimi (45–65 let) in starejšimi vozniki pri določenih parametrih niso bile ugotovljene statistično značilne razlike, rezultati nakazujejo tudi možnost postopnega pojavljanja starostno povezanih sprememb že pri srednje starih voznikih.

4 DISKUSIJA IN ZAKLJUČEK

Prometna varnost starejših voznikov je kompleksno področje, ki ga ni mogoče obravnavati zgolj z vidika posameznika, temveč kot interakcijo med voznikom, vozilom in prometnim okoljem [Polders, 2015], kar kažejo tudi rezultati naše raziskave. Analiza prometnih nesreč je pokazala, da se kljub splošnemu zmanjševanju števila prometnih nesreč delež starejših vozni-

kov obdelavo prometnih informacij, kar so dokazale tudi različne svetovne študije [Polders, 2015], [Lee, 2003], [Ulak, 2017]. Hkrati se kažejo razlike v vizualnem vedenju, saj starejši vozniki določene elemente opazujejo dlje časa, vendar jim v nekaterih primerih namenijo manj pozornosti (npr. pešcem). To nakazuje, da težava ni zgolj v zaznavi, temveč tudi v selekciji in obdelavi relevantnih informacij v prometnem okolju.

Starejši vozniki svoje vedenje pogosto prilagajajo lastnim omejitvam, povezanim s staranjem (npr. počasnejša vožnja, večja previdnost), vendar se hkrati pojavljajo določene pomanjkljivosti v poznavanju prometnih pravil ter večja negotovost v kompleksnejših prometnih situacijah [Polders, 2015], [Okonkwo, 2007], kar smo izvedeli in potrdili z rezultati anket. Ugotovitve in rezultati analize prometnih nesreč in eksperimentalnega dela dajejo dodatno potrditev, da so starejši vozniki posebno ranljivi v prometnih okoljih, ki zahtevajo hitro odločanje in obdelavo večjega števila informacij hkrati.

Rezultati eksperimentalnega dela kažejo, da starejši vozniki za zaznavanje in obdelavo prometnih informacij potrebujejo več časa, kar se odraža v daljših reakcijskih časih in drugačnih vzorcih vizualnega zaznavanja. To pomeni, da mora biti prometno okolje zasnovano na način, ki omogoča enostavnejše in pravočasno razumevanje prometnih situacij. Poseben poudarek je treba nameniti jasni, pregledni in pravočasno zaznavni prome-

tni signalizaciji, ustrezni preglednosti križišč ter zmanjševanju kompleksnosti prometnega okolja. Smiselna je tudi uporaba bolj kontrastne signalizacije, izboljšanje vidnosti pešcev ter infrastrukturne rešitve, ki zmanjšujejo potrebo po hitrem in kompleksnem odločanju voznikov.

Na podlagi vseh treh sklopov raziskave (analiza prometnih nesreč, eksperiment in anketa) lahko zaključimo, da ključni izziv prometne varnosti starejših voznikov ni zgolj v njihovih zmanjšanih psihofizičnih sposobnostih, temveč predvsem v neusklajenosti med zahtevnostjo prometnega okolja in njihovimi zmoglostmi. V tem kontekstu se kot eden ključnih ukrepov izkazuje ustrezno načrtovanje prometne infrastrukture. Rezultati kažejo, da mora biti prometna infrastruktura zasnovana pregledno, jasno in na način, ki omogoča hitro in pravilno interpretacijo prometnih informacij. Poseben poudarek je treba nameniti pravočasni in kontrastni signalizaciji, zmanjševanju kompleksnosti križišč, izboljšanju vidnosti pešcev ter splošni preglednosti prometnega prostora. Takšen pristop je skladen tudi s konceptom Vizije NIČ [Vision Zero Network, 2026], ki poudarja prilagajanje prometnega sistema človeku in njegovim omejitvam. Pri tem je pomembno poudariti, da prilagajanje infrastrukture starejšim voznikom ne pomeni koristi zgolj za to skupino, temveč prispeva k večji prometni varnosti vseh udeležencev v prometu. Rešitve, kot so bolj pregledna križišča, jasnejša bolj pregledna signalizacija in boljša vidnost ključnih elementov, izboljšujejo razumljivost prometnega okolja za vse voznike ne glede na starost.

Kljub pridobljenim ugotovitvam ima raziskava tudi določene omejitve. Eksperiment je bil izveden v simuliranem okolju, ki sicer omogoča nadzor nad pogoji, vendar ne more v celoti nadomestiti realnega prometnega okolja. Prav tako je velikost vzorca relativno omejena, kar lahko vpliva na splošno posplošljivost rezultatov. Kljub temu kombinacija različnih metod (analiza prometnih nesreč, eksperiment in anketa) omogoča celovit vpogled v obravnavano problematiko. Za nadaljnje raziskave bi bilo smiselno vključiti večji vzorec udeležencev ter primerjati rezultate z realnimi vožnjami (angl. naturalistic driving). Prav tako bi bilo smiselno podrobneje analizirati vpliv posameznih elementov infrastrukture na vedenje starejših voznikov.

5 LITERATURA

AMZS, Program Senior, <https://www.amzs.si/cvv/programi/starejsi-vozniki/program-senior>, 2026.

Chin, H. C., Zhou, M., A study of at-fault older drivers in light-vehicle crashes in Singapore, *Accident Analysis and Prevention*, 112, 50-55, 2018.

Cicchino, J. B., Why have fatality rates among older drivers declined? The relative contributions of changes in survivability and crash involvement, *Accident Analysis and Prevention*, 83, 67-73, 2015a.

Cicchino, J. B., McCartt, A. T., Critical older driver errors in a national sample of serious US crashes, *Accident Analysis and Prevention*, 80, 211-219, 2015b.

Chicco, D., Sichenze, A., Jurman, G., A simple guide to the use of Student's t-test, Mann-Whitney U test, Chi-squared test, and Kruskal-Wallis test in biostatistics, *BioData Mining*, 18, 56, 2025.

Davey, J. A., Older people and transport: coping without a car, *Ageing and Society*, 27, 49-65, 2006.

Davenne, D., Lericollais, R., Sagaspe, P., Taillard, J., Gauthier, A., Espié, S., Philip, P., Reliability of simulator driving tool for evaluation of sleepiness, fatigue and driving performance, *Accident Analysis & Prevention*, 45, 677-682, 2012.

Devlin, A., McGillivray, J. A., Self-regulation of older drivers with cognitive impairment: a systematic review, *Australas J Ageing*, 33, 74-80, 2014.

Dobbs, B. M., Wodzin, E., Vegega, M., Medical Conditions and Driving: A Review of the Literature (1960-2000), raziskovalno poročilo, National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2005.

European Commission, Socio-economic costs and the value of prevention, https://road-safety.transport.ec.europa.eu/european-road-safety-observatory/statistics-and-analysis-archive/post-impact-care/socio-economic-costs-and-value-prevention_en, 2026

Falkenstein, M., Karthaus, M., Brune-Cohors, U., Age-Related Diseases and Driving Safety, *Geriatrics (Basel)*, 5, 2020.

Gerbec, N., Projektiranje prometnih površin za starejše voznike in pešce, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2013.

Javna agencija Republike Slovenije za varnost prometa, Sožitje, <https://www.avp-rs.si/management-varnosti-cestnega-prometa/programi-za-vecjo-varnost/sozitie-za-vecjo-varnost-v-cestnem-prometu/>, 2026a.

Javna agencija Republike Slovenije za varnost prometa, Zemljevid prometnih nesreč, <http://nesrece.avp-rs.si/>, 2026b.

Karali, S., Gyi, D. E., Mansfield, N. J., Driving a better driving experience: a questionnaire survey of older compared with younger drivers, *Ergonomics*, 60, 4, 533-540, 2017.

Kecman, A. K., Primerjava voznških vzorcev mlajših in starejših voznikov v simulatorju vožnje, diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Fakulteta za računalništvo in informatiko, Ljubljana, 2023.

Kim, E., Muennig, P., Rosen, Z., Vision zero: a toolkit for road safety in the modern era, *Inj Epidemiol*, 4, 1, 2017.

Kim, S., Kondo, K., Noguchi, N., Akiyama, R., Ibe, Y., Yang, Y., Lee, B., Decreased Visual Search Behavior in Elderly Drivers during the Early Phase of Reverse Parking, But an Increase during the Late Phase, *Sensors (Basel)*, 23, 2023.

Kuniyoshi, J. R. G., Costa, A. T., Figueira, A. C., Kabbach, F. I., Larocca, A. P. C., Driver's visual perception as a function of

age. Using a driving simulator to explore driver's eye movements in vertical signs, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 11, 100460, 2021. Le, A. S., Suzuki, T., Aoki, H., Evaluating driver cognitive distraction by eye tracking: From simulator to driving, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 4, 100087, 2020.

Lee, H. C., The validity of driving simulator to measure on-road driving performance of older drivers, *Transport Engineering in Australia*, 8, 89-100, 2003.

Lococo, K. H., Staplin, L., Schultz, M. W., The Effects of Medical Conditions on Driving Performance: A Literature Review and Synthesis, raziskovalno poročilo, National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), 2018.

Mouratidis, K., Transport and quality of life: The car and its link to subjective well-being, health, and life domains, *Transport Policy*, 168, 101-111, 2025.

Okonkwo, O. C., Crowe, M., Wadley, V. G., Ball, K., Visual attention and self-regulation of driving among older adults, *International Psychogeriatrics*, 20, 2007.

Polders, E., Brijs, T., Vlahogianni, E., Papadimitriou, E., Yannis, G., Leopold, F., Durso, C., Diamandouros, K., ElderSafe - Risks and countermeasures for road traffic of the elderly in Europe, raziskovalno poročilo, European Commission - Directorate-General for Mobility and Transport (DG MOVE), 2015.

Rimmö, P.-A., Hakamies-Blomqvist, L., Older drivers' aberrant driving behaviour, impaired activity, and health as reasons for self-imposed driving limitations, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 5, 47-62, 2002.

Rumschlag, G., Palumbo, T., Martin, A., Head, D., George, R., Commissaris, R. L., The effects of texting on driving performance in a driving simulator: The influence of driver age, *Accident Analysis & Prevention*, 74, 145-149, 2015.

SAFE MOVE, SAFE MOVE for older drivers, <https://www.saferresearch.com/projects/safe-move-older-drivers>, 2026.

Sagar, S., Stamatiadis, N., Wright, S., Green, E., Use of codes data to improve estimates of at-fault risk for elderly drivers, *Accident Analysis and Prevention*, 144, 2020.

Služba Vlade Republike Slovenije za zakonodajo, Resolucija o nacionalnem programu varnosti cestnega prometa za obdobje od 2023 do 2030 (ReNPVCP23-30), <https://pisrs.si/pregled-Predpisa?id=RESO151>, 2026

Statistični urad Republike Slovenije, Potniški kilometri (mio. pkm) prebivalcev Slovenije, opravljeni z osebnimi avtomobili, registriranimi v Sloveniji, na slovenskem in tujem cestnem omrežju, Slovenija, letno, <https://pxweb.stat.si/SiStatData/pxweb/sl/Data/Data/2282001S.px/>, 2026. .

Tobii, Tobii Pro Lab Advanced behavioral research software, <https://www.tobii.com/products/software/behavior-research-software/tobii-pro-lab>, 2026.

Ulak, M. B., Ozguven, E. E., Spainhour, L., Age-Based Stratification of Drivers to Evaluate the Effects of Age on Crash Involvement, *Transportation Research Procedia*, 22, 551-560, 2017.

Urry, J., The 'System' of Automobility, *Theory, Culture & Society*, 21, 25-39, 2004.

Vision Zero Network, What is Vision Zero?, <https://visionzeronetwork.org/about/what-is-vision-zero/>, 2026.

World Health Organization, Road traffic injuries, <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>, 2023.

Zavarovalnica Triglav, Osvežitvene vožnje za starejše voznike 2025, <https://vozimse.si/osvezitvena-voznja/>, 2025.

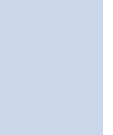


Iva Meglič, mag. inž. prom.
iva.meglic@student.um.si

red. prof. dr. Matjaž Šraml, univ. dipl. inž. str.
matjaz.sraml@um.si



mag. Ulrich Zorin, univ. dipl. inž. prom.
ulrich.zorin@dars.si
DARS, d. d.,
Ulica XIV. divizije 4, 3000 Celje



doc. dr. Chiara Gruden, dott. mag., Republika Italija
chiara.gruden1@um.si
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor



Znanstveni članek
UDK/UDC: 625.162.4:681.5

VPLIV ČASOVNIH ZAMIKOV PRENOSA PROMETNIH INFORMACIJ Z UPORABO ITS- IN C-ITS-SISTEMOV

THE IMPACT OF TIME DELAYS IN TRAFFIC INFORMATION TRANSMISSION USING ITS AND C-ITS SYSTEMS

Povzetek

Zanesljivo in pravočasno posredovanje prometnih informacij je eden ključnih dejavnikov za zagotavljanje varnosti in pretočnosti prometa na avtocestnem omrežju. V raziskavi so analizirane časovne zakasnitve pri prenosu informacij v okviru inteligentnih transportnih sistemov (ITS) in kooperativnih inteligentnih transportnih sistemov (C-ITS) na slovenskem avtocestnem omrežju s poudarkom na odseku med predoroma Jasovnik in Trojane. Namen raziskave je ovrednotiti učinkovitost obstoječih sistemov obveščanja ter vpliv časovnih zamikov na pravočasno informiranje voznikov ob izrednih dogodkih v predoru.

Analiza temelji na empiričnih podatkih Regionalnega nadzornega centra Vransko za izbrani dan, ki je bil določen na podlagi kriterija običajnih prometnih razmer, brez prisotnosti izrednih dogodkov ali večjih odstopanj od tipičnega prometnega poteka. S tem sta omogočena analiza tipičnega delovanja sistema ITS na obravnavanem odseku ter primerljivost rezultatov z vsakodnevni operativnimi pogoji. V analizi sta bili obravnavani jutranja in popoldanska prometna konica. Primerjani so bili ročni in avtomatski načini aktivacije prometnih portalov ter različni intervali posodabljanja mobilne aplikacije Promet+. Posebna pozornost je bila namenjena deležu voznikov, ki v kritičnem časovnem obdobju niso bili pravočasno obveščeni. Iz rezultatov je razvidno, da povprečni časovni zamik ročne aktivacije pri prometnih portalih znaša 34 sekund, pri kontinuirani posodobitvi aplikacije

Promet+ pa 27 sekund. V primeru avtomatizirane aktivacije so ti časi krajši: 25 sekund pri portalih in 18 sekund pri aplikaciji Promet+. To dokaže, da C-ITS omogoča hitrejši in zanesljivejši prenos informacij v primerjavi z ITS, pri čemer avtomatizacija in krajši intervali posodabljanja bistveno zmanjšujejo zakasnitve ter povečujejo delež pravočasno obveščenih voznikov. Ugotovitve potrjujejo, da integrirana uporaba ITS in C-ITS predstavlja najučinkovitejši pristop za izboljšanje prometne varnosti in odzivnosti sistema.

Ključne besede: Inteligentni transportni sistemi (ITS), kooperativni inteligentni transportni sistemi (C-ITS), hibridna komunikacija, prenos prometnih informacij

Summary

Reliable and timely transmission of traffic information is crucial for ensuring safety and traffic flow efficiency on motorway networks. This study examines time delays in information transmission within Intelligent Transport Systems (ITS) and Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS) on the Slovenian motorway network, focusing on the section between the Jasovnik and Trojane tunnels. The objective is to evaluate the effectiveness of existing notification systems and assess the impact of time delays on the timely notification of drivers in the event of incidents in tunnels.

The analysis is based on empirical data from the Regional Traffic Control Centre in Vransko for a representative day selected according to the criterion of normal traffic conditions, without exceptional events or significant deviations from the typical traffic pattern. Both morning and afternoon peak periods were considered. The study compares manual and automated activation of traffic portals, as well as different update intervals of the Promet+ mobile application. Particular attention is given to the proportion of drivers who were not informed within the critical time window. The results show that the average delay for manual activation of the traffic portals is 34 seconds, and for the continuously updated Promet+ app it is 27 seconds. In the case of automatic activation, these delays are much shorter: 25 seconds for the portals and 18 seconds for the Promet+ app. This indicates that C-ITS enables faster and more reliable information transmission compared to conventional ITS. Automation and shorter update intervals significantly reduce delays and increase the proportion of drivers informed in a timely manner. The findings confirm that the integrated use of ITS and C-ITS is the most effective approach to improving traffic safety and system responsiveness.

Key words: Intelligent Transport Systems (ITS), Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS), Hybrid Communication; Traffic Information Transmission

1 UVOD

Prometni sistemi se v sodobnem okolju soočajo z vse večjo kompleksnostjo, kar zahteva napredne pristope k zagotavljanju njihove učinkovitosti, zanesljivosti in predvsem varnosti. V tem okviru predstavljajo inteligentni transportni sistemi (ITS) in kooperativni inteligentni transportni sistemi (C-ITS) ključna koncepta, ki vsak na svoj način prispevata k izboljšanju upravljanja prometa ter zmanjšanju tveganj na cestnem omrežju. ITS temeljijo na integraciji informacijskih in komunikacijskih tehnologij z namenom optimizacije prometnih tokov, povečanja varnosti in zmanjšanja negativnih vplivov prometa na okolje (Chowdhury et al., 2026.; Ferrante et al., 2021). V praksi ITS zajemajo različne infrastrukturne rešitve, kot so sistemi videonadzora, detekcije prometa, spremenljiva prometna signalizacija, vremenske postaje in drugi nadzorni elementi, ki jih upravljajo prometni nadzorni centri. Ti sistemi voznikom posredujejo informacije o prometnih razmerah, omejitvah in morebitnih nevarnostih. Njihova učinkovitost pa je omejena z dejstvom, da komunikacija poteka posredno, preko obsestne signalizacije, kar pomeni, da je pravočasen odziv odvisen od voznikove zaznave in interpretacije podanih informacij. V dinamičnih prometnih situacijah, zlasti na odsekih z večjim tveganjem, kot so območja pred predori, lahko takšne časovne zakasnitve pomembno vplivajo na varnost prometa.

Kot nadgradnja teh pristopov so se razvili C-ITS, ki temeljijo na neposredni izmenjavi podatkov med udeleženci v prometu in infrastrukturo (Deveci et al., 2023; Summala et al., 2000). Z uporabo brezžičnih komunikacijskih tehnologij omogočajo sprotno posredovanje informacij neposredno v vozilo, s čimer se bistveno skrajša čas od zaznave dogodka do posredovanja obvestila vozniku. Takšen način komunikacije omogoča hitrejše odzivanje na prometne razmere, kar je še posebno pomembno pri nenadnih dogodkih in v kritičnih okoljih.

Na evropski ravni ima pomembno vlogo pri uvajanju teh tehnologij pobuda C-ROADS (Pinkelnig et al., 2023), v katero je vključena tudi Slovenija. Ta aktivno uvaja rešitve ITS in C-ITS, predvsem na avtocestnem omrežju. Po podatkih poročila C-ROADS (Pinkelnig et al., 2023) iz leta 2022 je bila infrastruktura ITS-G5 vzpostavljena na približno 34 kilometrih slovenske-

ga omrežja TEN-T, zlasti na avtocesti A1 in hitri cesti H4, pri čemer se omrežje v zadnjih letih dodatno širi. Ključni cilj teh aktivnosti je vzpostavitev hibridne komunikacije med infrastrukturo in vozili (I2V in V2I), ki voznikom omogoča dostop do prometnih informacij v realnem času, med drugim preko mobilne aplikacije Promet+.

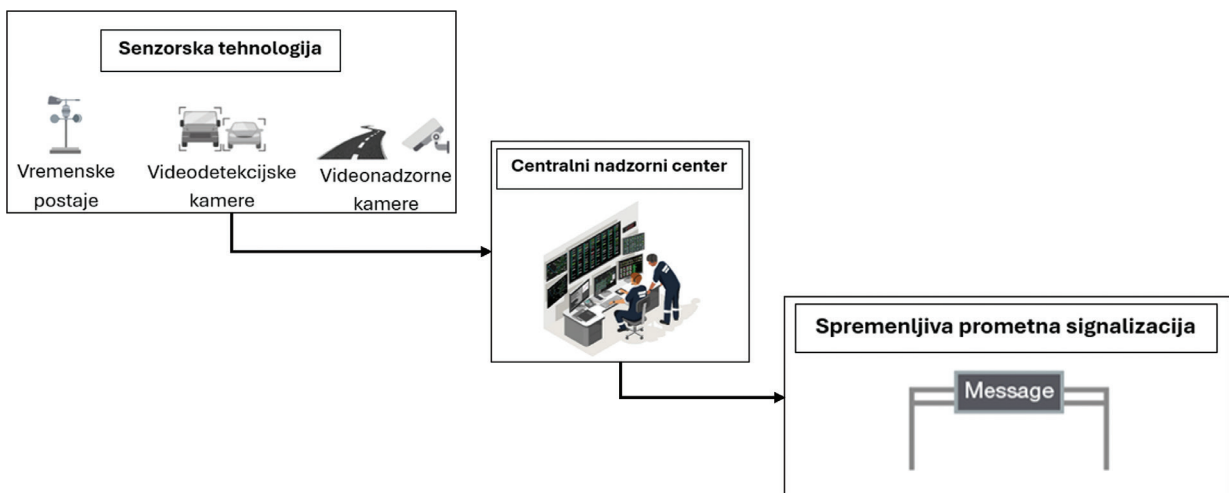
Kljub intenzivnemu razvoju in implementaciji obeh sistemov ostaja odprto vprašanje njune dejanske učinkovitosti v realnih prometnih razmerah. Posebno pomembna je ocena hitrosti prenosa informacij ter deleža uporabnikov, ki so pravočasno obveščeni o prometnih dogodkih. V tem prispevku je analizirano delovanje ITS in C-ITS na izbranem odseku slovenskega avtocestnega omrežja med predoroma Jasovnik in Trojane. Analiza temelji na predhodno objavljeni raziskavi *The Impact of Time Delays in Traffic Information Transmission Using ITS and C-ITS Systems: A Case-Study on a Motorway Section Between Two Tunnels* (Meglič, 2025), pri čemer je vsebina prilagojena slovenskemu strokovnemu prostoru. Na podlagi primerjave časovnih zamikov pri posredovanju informacij ter analize dosega obveščanja je podana ocena njune učinkovitosti obravnavanih sistemov z vidika pravočasnosti posredovanja prometnih informacij voznikom.

2 ITS IN C-ITS

2.1 Inteligentni transportni sistemi

Inteligentni transportni sistemi (ITS) predstavljajo interdisciplinarno področje, ki združuje informacijske in komunikacijske tehnologije za podporo upravljanju prometa. Njihovi glavni cilji so izboljšanje varnosti, optimizacija prometnih tokov ter povečanje učinkovitosti cestnega omrežja (Garg et al., 2022). ITS se uporabljajo na več področjih, kot so upravljanje prometa, preprečevanje nesreč, cestninjenje, parkirni sistemi in nadzor okoljskih vplivov (Federal Ministry for Transport, Innovation and Technology, 2016; Asselin-Miller et al., 2016).

Sistemi temeljijo na integraciji cestne infrastrukture, senzorjev in komunikacijskih omrežij, ki omogočajo neprekinjeno zbiranje in izmenjavo prometnih podatkov v realnem času (Böhm et al., 2011). Kot je prikazano na Sliki 1, podatki iz senzorjev, videonadzornih sistemov in prometne signalizacije preko



Slika 1. Koncept prenosa podatkov ITS-sistemov

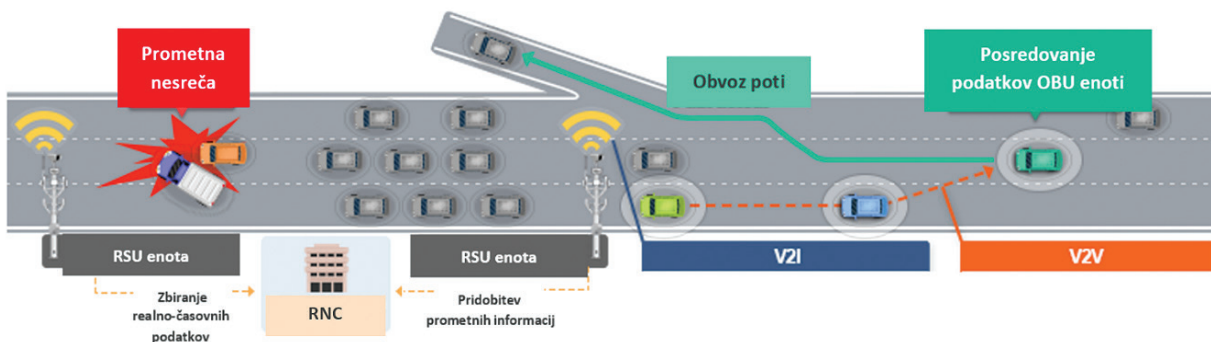
komunikacijskih omrežij potujejo do regionalnih ali nacionalnih nadzornih centrov, kjer se obdelajo in uporabijo za upravljanje prometa.

Na podlagi teh informacij lahko operaterji ročno ali avtomatizirano prilagajajo prometno signalizacijo ter obveščajo udeležence v prometu prek spremenljivih prometnih znakov. Ključen element sistema je komunikacijska infrastruktura, saj pasovna širina in zanesljivost prenosa podatkov neposredno vplivata na hitrost obdelave informacij in posledično na učinkovitost obveščanja (Cerritos College, Japanese ITS, 2024).

2.2 Kooperativni inteligentni transportni sistemi

Kooperativni inteligentni transportni sistemi (C-ITS) predstavljajo napredno razširitev ITS, ki omogoča neposredno in avtomatizirano izmenjavo informacij med vozili, infrastrukturo in drugimi udeleženci v prometu. Komunikacija poteka v okviru povezav V2V, V2I/I2V in V2P, kar omogoča hitreje zaznavanje in posredovanje prometnih informacij ter s tem podporo varnejšemu in predvidljivejšemu prometnemu okolju (Weber et al., 2021; Ghorri, 2018).

Glavni namen C-ITS je zagotavljanje pravočasnih in natančnih informacij o prometnih razmerah, kot so nesreče, nevarni odseki ali spremenjene prometne razmere, kar omogoča prilagoditev vedenja voznikov v realnem času (ASECAP, 2021; Austrian Government, Intelligent Transport Systems, 2024). S tem C-ITS neposredno vpliva na učinkovitost prenosa informacij in zmanjševanje reakcijskih časov v prometnem sistemu.



Slika 2. Komunikacija C-ITS-sistema (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2024)

Arhitektura C-ITS, skladna s standardom ISO 21217, je zasnovana večplastno in vključuje dostopni sloj, omrežni in transportni sloj ter aplikacijski (funkcijski) sloj. Ta struktura omogoča interoperabilnost med različnimi ITS-komponentami ter zanesljivo in standardiziran prenos podatkov med ITS-postajami in nadzornimi sistemi (ISO 21217:2020; Böhm et al., 2011). Ključni podarek arhitekture je zagotavljanje učinkovite in pravočasne komunikacije, pri čemer imata pomembno vlogo zanesljivost komunikacijskih poti in možnost uporabe različnih tehnologij, kot so ITS-G5 ter mobilna omrežja (3G-5G).

Interoperabilnost in razširljivost sistema omogočata integracijo različnih naprav in tehnologij ter prilagajanje naraščajočemu številu povezanih vozil in uporabnikov, kar je ključno za delovanje v dinamičnem prometnem okolju.

2.3 Hibridna komunikacija

C-ITS deluje na podlagi robustnih komunikacijskih omrežij, ki omogočajo izmenjavo podatkov med OBU-enotami, RSU-enotami in RNC. Ta omrežja vključujejo komunikacijske tehnologije kratkega dosega, kot je ITS-G5, ki temelji na frekvenčnem območju 5,9 GHz, ter tehnologije dolgega dosega, kot so 4G, 5G in satelitska komunikacija, ki omogočajo širšo povezljivost in integracijo z oblakom (ASECAP, 2021). Hibridna komunikacija v C-ITS-sistemih združuje različne dostopne tehnologije in komunikacijske protokole, kar omogoča ustvarjanje fleksibilnega in robustnega sistema (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2024; ASECAP, 2021). Ta pristop vključuje mikrovalovne komunikacije na kratki doseg, kot je ITS-G5, ter mobilna omrežja na dolgi doseg, kot sta 4G in 5G (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2024; ASECAP, 2021). S kombinacijo teh tehnologij se oblikuje prilagodljiv komunikacijski sistem, ki lahko zadostuje različnim operativnim potrebam in scenarijem. Komunikacije na kratki doseg, kot je ETSI ITS-G5, omogočajo izmenjavo podatkov v realnem času med vozili in občestno infrastrukturo, kar je ključno za takojšnja varnostna opozorila in učinkovito upravljanje prometa (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2024; ASECAP, 2021). Komunikacijska omrežja na dolgi doseg pa omogočajo širšo pokritost in podporo storitvam, ki zahtevajo obsežen prenos podatkov, kot sta upravljanje prometa in oddaljeno spremljanje. Z uporabo hibridnega pristopa sistemi C-ITS izkoriščajo prednosti obeh vrst komunikacij, kar zagotavlja neprekinjeno in zanesljivo izmenjavo podatkov. Ta sposobnost je bistvena za podporo naprednim aplikacijam, kot sta avtomatizirana vožnja in dinamično upravljanje prometa (Austrian Government, Intelligent Transport Systems, 2024; ASECAP, 2021).

3 METODOLOGIJA

3.1 ITS- in C-ITS-infrastruktura v Sloveniji

Na slovenskem avtocestnem omrežju upravljanje prometa temelji na dveh ključnih inteligentnih transportnih sistemih, in sicer na sistemu za nadzor in vodenje prometa (SNVP) ter na nadzorno-krmilnem sistemu predorov (NKS). Njuno delovanje je integrirano preko naprednega informacijskega sistema Kažipot II, ki ga upravlja podjetje DARS. Sistem omogoča kontinuirano zbiranje, obdelavo in distribucijo prometnih podatkov v realnem času, kar zagotavlja pravočasno posredovanje informacij tako upravljavcem kot uporabnikom cestne infrastrukture. Prometne informacije se prek različnih komunikacijskih kanalov posredujejo javnosti, hkrati pa sistem omogoča avtomatizirano

rano obveščanje pristojnih institucij, kot so policija, Direkcija RS za infrastrukturo in ministrstvo, kar bistveno izboljšuje odzivnost ob izrednih dogodkih. SNVP je zasnovan za zgodnje zaznavanje prometnih motenj, vključno z nesrečami, zastoji in drugimi izrednimi situacijami, ter za učinkovito informiranje udeležencev v prometu. Temelji na integraciji različnih tehnoloških komponent, ki omogočajo celovito spremljanje in upravljanje prometnih tokov. Med ključne elemente sodijo videonadzorni sistemi, senzorji za merjenje gostote in hitrosti prometa, mikrovalovni detektorji, vremenske postaje, sistemi za nadzor višinskih omejitev ter spremenljiva prometno-informacijska signalizacija (SPIS). Integrirano delovanje teh komponent omogoča prilagodljivo in usklajeno upravljanje prometa glede na dejanske razmere na cestnem omrežju. Pomemben del sistema je SPIS-signalizacija, ki zagotavlja dinamično obveščanje voznikov (Njord et al., 2006; Ghahremanezhad et al., 2022). Informacije so podane s kombinacijo standardiziranih simbolov in besedilnih sporočil ter vključujejo podatke o vrsti dogodka, njegovi lokaciji, posledicah in priporočenih ukrepih (Njord et al., 2006). Tak pristop omogoča hitro in enotno razumevanje informacij ne glede na jezikovne razlike med uporabniki. Signalizacija je zasnovana v skladu z načeli uporabniškega vmesnika človek-stroj (HMI, Human Machine Interface), kar zagotavlja optimalno količino informacij na ključnih odsekih. V praksi se uporablja v različnih oblikah, kot so portali, polportali in samostojni prikazovalniki, pri čemer portali nad celotno širino vozišča omogočajo učinkovito opozarjanje na nepričakovane dogodke ter prispevajo k večji varnosti in pretočnosti prometa (Zorin, 2010). Na področju kooperativnih inteligentnih transportnih sistemov Slovenija postopno uvaja rešitve, ki temeljijo na povezovanju vozil, infrastrukture in upravljaljskih sistemov. Ključen koncept pri tem je hibridna komunikacija, ki združuje kratkosežne komunikacijske tehnologije (npr. ITS-G5) in mobilna omrežja (3G, 4G, LTE ter v prihodnje 5G). Takšen pristop omogoča zanesljivo in neprekinjeno izmenjavo podatkov med vozili, cestno infrastrukturo in nadzornimi centri ne glede na prometne ali vremenske

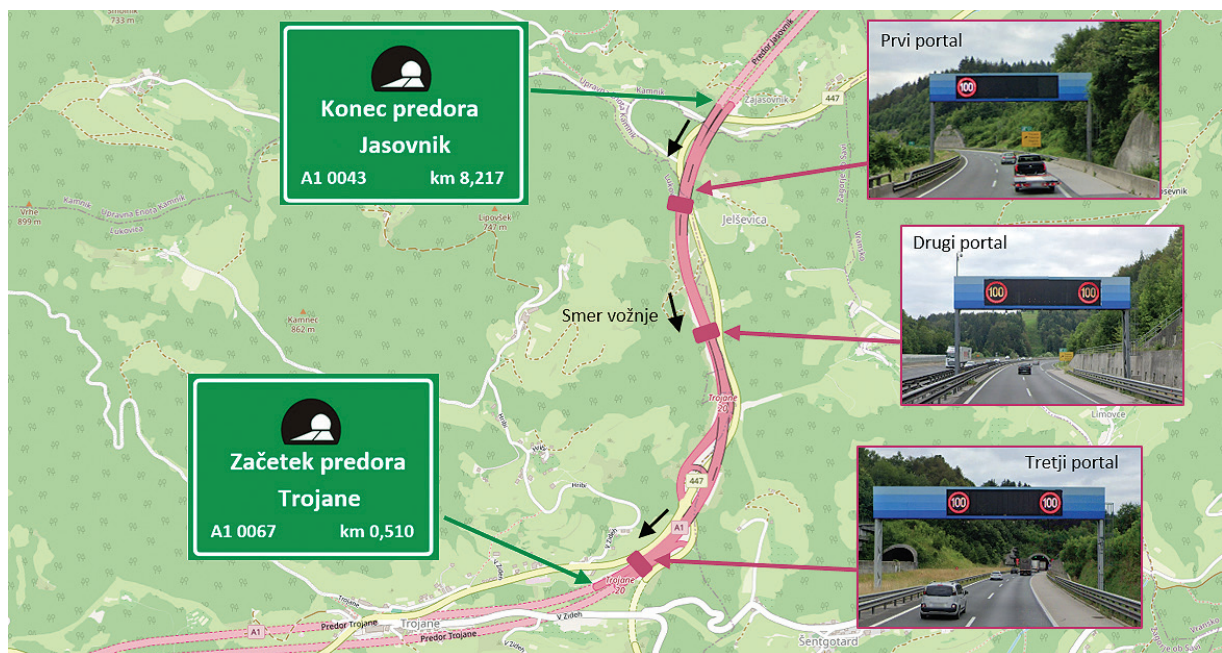
razmere. Pomemben element C-ITS-infrastrukture v Sloveniji je mobilna aplikacija Promet+, ki omogoča dostop do prometnih podatkov v realnem času preko mobilnih omrežij. Aplikacija deluje kot funkcionalni nadomestek vgrajenih enot v vozilih in omogoča neposredno posredovanje informacij uporabnikom. Poleg osnovnega obveščanja o prometnih razmerah podpira tudi virtualno signalizacijo, kar je še posebno pomembno v pogojih zmanjšane vidljivosti, kjer fizična signalizacija ni zadostna. Z razvojem omrežij 5G se pričakujejo še večja zanesljivost, hitrost prenosa podatkov in učinkovitost celotnega sistema, kar predstavlja pomemben korak k razvoju naprednih, povezanih prometnih rešitev (aplikacija Promet+).

3.2 Študija primera

Za celovito analizo časovnih zamikov pri prenosu prometnih informacij je bila obravnavana študija primera na avtocestnem odseku med predoroma Jasovnik in Trojane na avtocesti A1 v smeri proti Ljubljani. Izbira tega odseka temelji na njegovi prometni pomembnosti, visokih prometnih obremenitvah ter zahtevnih geografskih in prometnih razmerah, ki pomembno vplivajo na delovanje inteligentnih transportnih sistemov (ITS) in kooperativnih inteligentnih transportnih sistemov (C-ITS). Učinkovitost sistemov je bila presojana z vidika dveh glavnih kazalnikov: deleža voznikov, ki zaradi prepoznega posredovanja informacij niso bili pravočasno seznanjeni s prometnimi razmerami, ter razlik v časovnih zamikih pri različnih načinih prenosa informacij. Pri tem so bili uporabljeni podatki iz tradicionalnih prometno-informacijskih portalov, ki predstavljajo klasične ITS-rešitve, ter podatki iz mobilne aplikacije Promet+, ki ponazarja pristop na osnovi C-ITS.

3.2.1 Geografska umestitev

Obravnavani odsek se razteza od stacionaže km 8,212 na odseku 0043 (predor Jasovnik) do stacionaže km 0,510 na odseku 0067 (predor Trojane), v skupni dolžini 2,219 km. Od tega



Slika 3. Obravnavani avtocestni odsek med predoroma Jasovnik in Trojane z označenimi lokacijami portalov

1.709 km pripada odseku 0043 in 0.510 km odseku 0067, kar ustreza razdalji med kilometroma 77.000 in 79.219. Odsek poteka skozi občini Lukovica in Zagorje ob Savi ter predstavlja pomemben prometni koridor med osrednjo Slovenijo in Zasavjem.

Na tem odseku so nameščeni trije ITS-portali, ki omogočajo dinamično upravljanje prometa in obveščanje voznikov v realnem času:

- prvi portal stoji 1,769 km pred vhodom v predor Trojane,
- drugi portal stoji 50 m pred izvozom Trojane (1,177 km pred predorom),
- tretji portal stoji 154 m pred vhodom v predor.

Vsi portali so povezani z Regionalnim nadzornim centrom (RNC) Vransko, ki omogoča daljinsko upravljanje, hitro zaznavanje prometnih razmer in prilagajanje prometne signalizacije.

3.2.2 Prometne razmere in vhodni podatki

Začetna faza analize je bila usmerjena v oceno prometne zmogljivosti obravnavanega odseka v obdobjih največjih obremenitev, z namenom določiti, koliko vozil prevozi ta del avtoceste v določenem časovnem intervalu. V ta namen so bili uporabljeni podatki o prometnih tokovih in povprečnih hitrostih, pridobljeni z avtomatskega števca prometa QLTC8 na merilnem mestu Trojane-Blagovica (0067).

Osnova analize je koncept konične ure, ki v prometnem inženirstvu predstavlja časovni interval z največjo prometno obremenitvijo in s tem najzahtevnejše pogoje za vrednotenje zmogljivosti ter ravni prometne storitve. Konična ura je opredeljena kot zaporednih 60 minut z največjim številom vozil v dnevu. Pri določanju tega intervala se običajno uporabljajo podatki iz delovnih dni med torkom in četrtkom, saj ti najbolj zanesljivo odražajo običajne prometne razmere, medtem ko promet ob ponedeljkih in petkih pogosto odstopa od tipičnih vzorcev.

V okviru študije je bila konična ura določena na podlagi 16-urnega štetja prometa, izvedenega 16. oktobra 2024. Datum je bil izbran v sodelovanju s strokovnjaki družbe DARS, saj v tem obdobju niso bili zaznani izredni dogodki, ki bi bistveno vplivali na potek prometa, kar omogoča analizo tipičnega prometnega toka na obravnavanem odseku. Rezultati so pokazali dve izraziti konični obdobji – jutranje med 5.30 in 6.30 ter popoldansko med 14.16 in 15.16 –, ki sta bili uporabljeni kot referenčni obdobji za nadaljnje analize. V jutranji konici je skozi predor Trojane peljalo 2.918 vozil, od tega 1.856 po voznem in 1.062 po prehitevalnem pasu. V popoldanskem obdobju je bilo zabeleženih 1.554 vozil, pri čemer jih je 905 vozilo po voznem pasu in 649 po prehitevalnem pasu. Povprečna hitrost vozil je v obeh primerih bila približno 101 km/h.

Podrobnejši podatki o prometnih tokovih, ki služijo kot vhodni parametri za nadaljnje izračune, so sistematično predstavljeni v pripadajočih tabelah (Preglednica 1 in Preglednica 2).

Čas	Število vozil na voznem pasu	Vsota tovornih vozil nad 7,5 t na voznem pasu	Vsota vozil na prehitevalnem pasu pas	Vsota tovornih vozil nad 7,5 t na voznem pasu	Vsota vozil obeh pasov
5.27-6.27	1.059	309	1.819	6	2.878
5.28-6.28	1.059	300	1.815	6	2.874
5.29-6.29	1.057	308	1.837	6	2.894
5.30-6.30	1.062	307	1.856	6	2.918
5.31-6.31	1.061	298	1.835	6	2.896
5.32-6.32	1.058	299	1.819	6	2.877

Preglednica 1. Prometni podatki predora Trojane v času jutranje konične ure dne 16. 10. 2024

Čas	Število vozil na voznem pasu	Vsota tovornih vozil nad 7,5 t na voznem pasu	Vsota vozil na prehitevalnem pasu pas	Vsota tovornih vozil nad 7,5 t na voznem pasu	Vsota vozil obeh pasov
14.13-15.13	905	299	610	5	1.515
14.14-15.14	904	314	637	5	1.541
14.15-15.15	904	318	644	5	1.548
14.16-15.16	905	321	649	5	1.554
14.17-15.17	894	320	637	4	1.531
14.18-15.18	895	323	646	4	1.541

Preglednica 2. Prometni podatki predora Trojane v času popoldanske konične ure dne 16. 10. 2024

3.2.3 Načini prenosa prometnih informacij

Analiza vključuje štiri osnovne načine prenosa informacij do uporabnikov:

- ročni prenos na ITS-portale,
- avtomatiziran prenos na ITS-portale,
- ročni prenos v mobilno aplikacijo Promet+,
- avtomatiziran prenos v mobilno aplikacijo Promet+.

Pri ročni aktivaciji ITS-portalov se prometni dogodki praviloma zaznavajo prek videonadzornih sistemov, integriranih v sistem za upravljanje in vodenje prometa ter nadzorni sistem predorov. Po zaznavi je v proces vključen fiksni desetsekundni časovni zamik, ki je bil po pojasnilu upravljavca sistema (DARS, d. d.) uveden kot del operativne konfiguracije sistema. Zamik omogoča lokalno obdelavo podatkov pred njihovim prenosom, s čimer se zmanjšuje verjetnost napak ter zagotavlja večja zanesljivost in časovna usklajenost delovanja povezanih podsistemov. Po preteku tega intervala se informacije posredujejo v RNC, kjer se izvede dodatna obdelava v približno treh sekundah, odvisno od lokacije dogodka in sistemskih dejavnikov. Sledita presoja dogodka s strani upravljavca prometa ter ročna aktivacija ustreznega opozorilnega sporočila na prometnih portalih v primeru potrditve njegove relevantnosti. Ker natančni podatki o času posameznih operativnih korakov aktivacije niso na voljo, se v analizi predpostavlja, da identifikacija ustreznih kamer, priprava in aktivacija vsebin na portalih ter potrditev nevarnosti skupaj trajajo približno deset sekund. Nato sledi prenos informacij od RNC do portalov, ki po podatkih za leto 2024 (RNC Vransko) za portale pred predorom Trojane v povprečju traja približno enajst sekund. Celoten proces, od zaznave do prikaza opozorila, tako v povprečju traja približno 34 sekund, pri čemer pomemben delež skupne zakasnitve predstavlja odzivni čas operaterja.

V nasprotju z ročno aktivacijo avtomatiziran prenos informacij do ITS portalov poteka brez človeškega posredovanja. Sistem samodejno zaznava kritične dogodke, kot so vožnja v napačno smer, pojav dima ali požar, ter sproži ustrezne upravljavske ukrepe (npr. prilagoditev omejitve hitrosti, prikaz opozoril ali zaporo predora). V primeru predora Trojane, kjer je implemen-

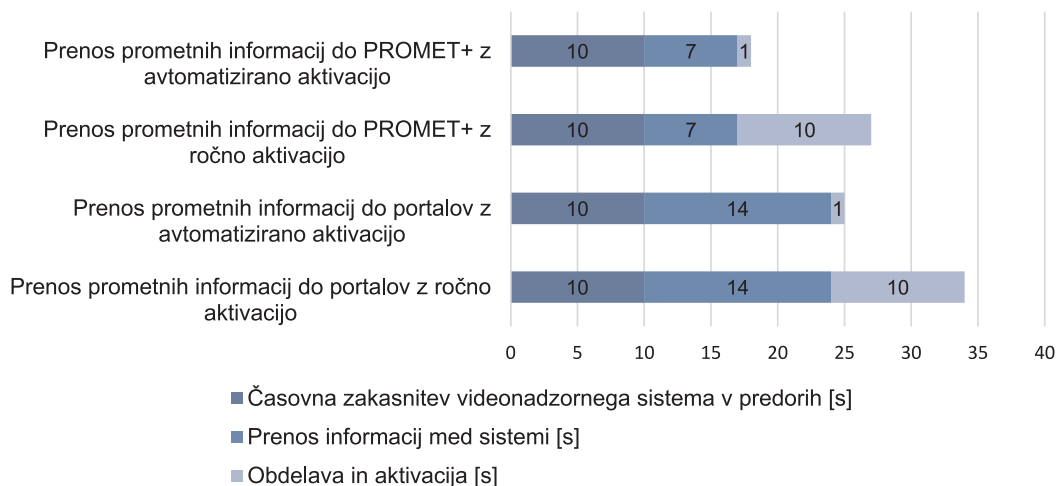
tirana videodetekcija, je v začetni fazi vključen desetsekundni časovni zamik, ki je enak kot pri ročnem postopku aktivacije in predstavlja vnaprej določeno sistemsko zakasnitev pred prenosom podatkov. Po zaznavi nevarnosti podatki v približno treh sekundah prispejo v sistem Kažipot (nacionalni prometnoinformacijski sistem), kjer se obdelajo v približno eni sekundi in samodejno sprožijo generiranje ustrezne vsebine za prometne portale. Uporabljeni časovni parametri temeljijo na informacijah podjetja Realis, razvijalca ITS-sistemov, ki jih uporablja DARS. Nadaljnji prenos do ITS-portalov poteka v enakem časovnem okviru kot pri ročnem postopku in v povprečju traja približno enajst sekund.

Skupni čas od zaznave do prikaza sporočila pri avtomatiziranem načinu znaša približno 25 sekund, kar omogoča hitrejšo in bolj odzivno obveščanje voznikov v primerjavi z ročnim načinom. Pri tem je treba poudariti, da čas trajanja avtomatiziranega procesa ni konstanten, saj je odvisen od dejavnikov, kot so vremenske razmere, obremenjenost komunikacijskega omrežja in konfiguracija sistema.

Podoben princip velja za ročni prenos informacij v mobilno aplikacijo Promet+. Po potrditvi dogodka v RNC operater posreduje podatke v sistem Kažipot, ki deluje kot integracijski vmesnik za povezavo z mobilno aplikacijo. Ta dodatna faza prenosa traja približno štiri sekunde, kar pomeni, da skupna zakasnitev od zaznave do obvestila uporabniku znaša približno 27 sekund.

Najkrajši odzivni čas je dosežen pri popolnoma avtomatiziranem prenosu prek sistema C-ITS v aplikacijo Promet+. V tem primeru se zaznani dogodek samodejno validira v sistemu Kažipot brez posredovanja operaterja. Po validaciji se opozorilo v približno štirih sekundah neposredno posreduje uporabniku. Celoten proces od zaznave do obvestila tako v povprečju traja približno 18 sekund, kar predstavlja najhitrejši način posredovanja informacij ter jasno prednost avtomatiziranih C-ITS-rešitev z vidika pravočasnega obveščanja udeležencev v prometu.

Na podlagi analize prometnih konic in opredelitve različnih načinov posredovanja prometnih informacij je bila izvedena tudi kvantitativna ocena učinkovitosti obveščanja. Analiza obravnava število voznikov, ki o prometnem dogodku niso ob-



Slika 4. Časovni zamik prenosa prometnih informacij do portalov in aplikacije Promet+

veščeni pravočasno in zato nimajo možnosti ustreznega odziva (npr. izbira alternativne poti), kar lahko pomembno prispeva k nastanku zastojev, zlasti na območju pred predorom Trojane.

V prvem delu analize je poudarek na obveščanju prek ITS-portalov, kjer se preučuje vpliv časovnih zakasnitev na pravočasnost posredovanja informacij. Posebej se ocenjuje delež voznikov, ki zaradi teh zakasnitev niso pravočasno informirani, kar omejuje njihovo možnost izbire alternativnih poti in posledično vpliva na prometne razmere.

Število nepravočasno obveščenih voznikov prek portalov se določi z enačbo:

$$N_p = \left(\frac{(d_p + d_{pregl}) \cdot 3600}{V_{povp,i}} \cdot q_k \right) + t_i \cdot q_i \quad (1)$$

kjer je:

- N_p število voznikov, ki niso pravočasno obveščeni o dogodku s portala [voz]
- d_p oddaljenost portala od zaprtega predora oz. dela ceste [km]
- d_{pregl} minimalna oddaljenost od portala za ustrezno preglednost portala [km]
- $V_{povp,i}$ povprečna hitrost vozil v konični uri i [km/h]
- q_i prometna obremenitev v konični uri i [voz/s]
- t_i časovni zamik prenosa informacij do voznikov [s]

Drugi del analize preučuje prenos informacij do mobilne aplikacije Promet+. Analiza bo zajela dva scenarija, kontinuirano posodabljanje, pri katerem aplikacija takoj obvesti voznike o morebitni nevarnosti, in periodično posodabljanje, kjer aplikacija preverja nove informacije sistema vsakih 60 sekund. V obeh primerih se bo ocenil vpliv ročne in avtomatizirane aktivacije prenosa informacij ter bo analizirano, koliko voznikov ni pravočasno obveščenih o izrednem dogodku, ob predpostavki, da imajo vsi nameščeno mobilno aplikacijo Promet+, vključeno zvočno opozorilo in ustrezno nastavljen prikaz vizualnih obvestil na mobilni napravi. Kontinuirano posodabljanje aplikacije Promet+ omogoča takojšnje obveščanje voznikov o izrednih dogodkih. Kljub temu pa zaradi časovnega zamika pri prenosu informacij določeno število voznikov ni pravočasno seznanjenih z izrednim dogodkom v predoru Trojane, preden dosežejo prizadeto območje, v tem primeru predor Trojane. Ta zamik je odvisen od vrste aktivacije ter gostote prometa v času dogodka. Število voznikov, ki niso pravočasno obveščeni z mobilno aplikacijo Promet+ pri kontinuirani posodobitvi, se izračuna po naslednji enačbi:

$$N_{KP+} = t_i \cdot q_i \quad (2)$$

kjer je:

- N_{KP+} število voznikov, ki niso pravočasno obveščeni o dogodku z aplikacijo Promet+ [voz]
- t_i časovni zamik prenosa informacij do voznikov [s]
- q_i število vozil v konični uri i [voz/s]

Zaradi visoke porabe baterije pri kontinuirani posodobitvi aplikacija trenutno deluje s 60-sekundnim intervalom posodobitve. Tak način delovanja vpliva na pravočasnost obveščanja voznikov o izrednih dogodkih, saj lahko med posodobitvijo pride do pomembnih sprememb v prometnem toku. Ker ob 60-sekundnem intervalu ni mogoče natančno določiti trenutka,

kdaj bo aplikacija prejela in obdelala prometno informacijo, se analiza osredotoča na najslabši možni scenarij. Predpostavlja se, da lahko v neugodnem primeru aplikacija Promet+ potrebuje dodatnih 60 sekund za obdelavo podatkov in obveščanje voznikov. V nadaljevanju je ocenjen vpliv tega časovnega zamika na število voznikov, ki zaradi 60-sekundnega intervala posodobitve niso pravočasno obveščeni. Izračun temelji na prometni obremenitvi v konični uri in časovnem zamiku sistema, pri čemer se uporabi naslednja enačba:

$$N_{p+,60sek} = (T_k + 60s) \cdot q_i \quad (3)$$

kjer je:

- q_i prometna obremenitev v konični uri i [voz/s]
- T_k časovni zamik prenosa informacij do voznikov [s]

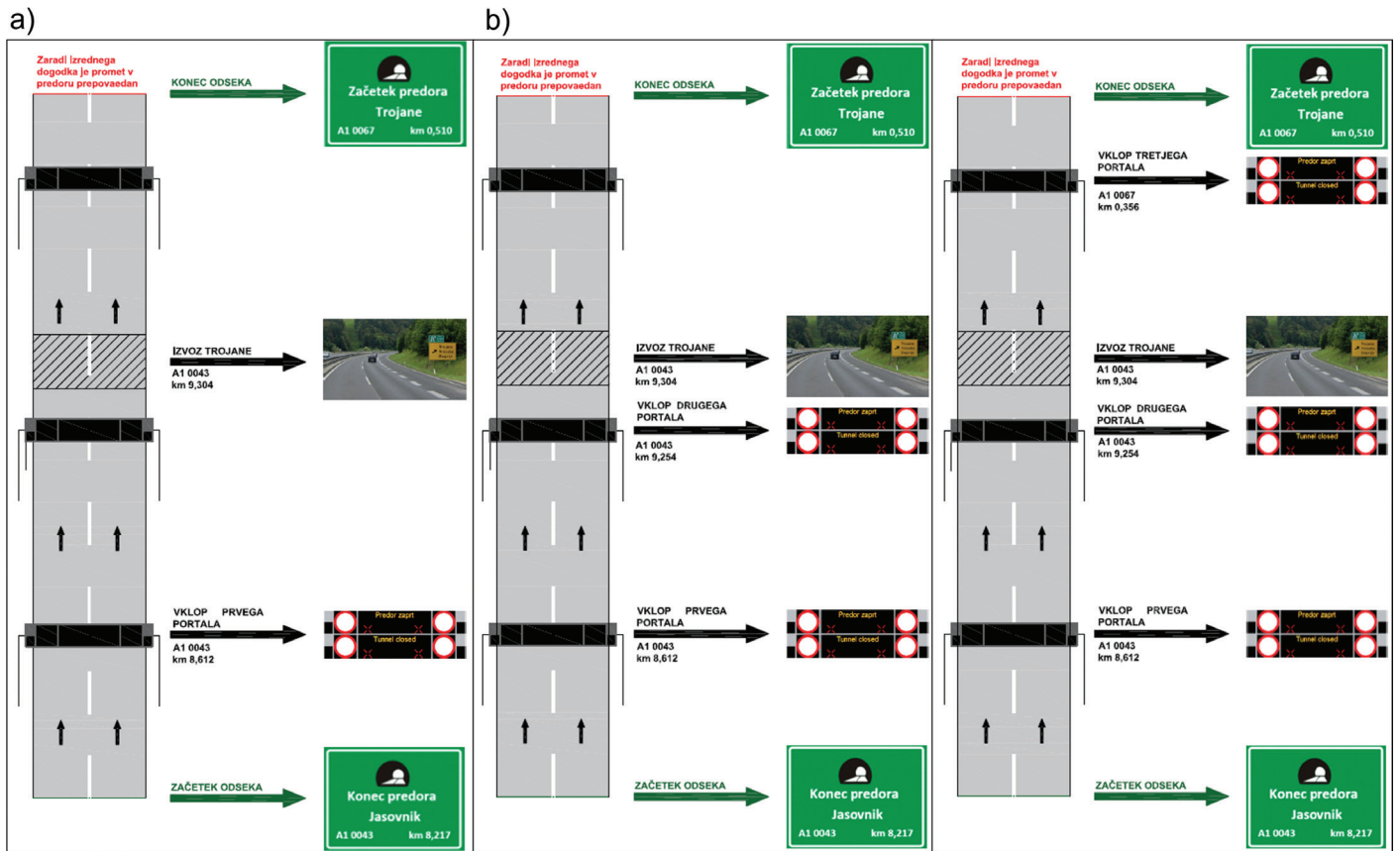
4 REZULTATI

4.1 Aktivacija SPIS-portalov

Napaka! Vira sklicevanja ni bilo mogoče najti. prikazuje tri variante aktivacije portalov ob nastanku izrednega dogodka v predoru Trojane, zaradi katerega je promet skozi predor onemogočen. Prva varianta (Slika 2.a) vključuje samo aktivacijo prvega portala, ki je nameščen 1,769 km pred vhodom v predor, ob zaprtju prikaže obvestilo "Predor zaprt / Tunnel closed". Zaradi njegove lokacije, 0,642 km pred izvozom Trojane, imajo vozniki še vedno možnost pravočasne preusmeritve, kar jim omogoča izogib nepotrebnemu čakanju pred zaporo. Slika 2.b prikazuje sočasno aktivacijo prvega in drugega portala ob izrednem dogodku v predoru Trojane, zaradi katerega je promet skozi predor onemogočen. Drugi portal je nameščen 0,050 km pred izvozom Trojane in 1,177 km pred vhodom v predor. Tako kot pri prvem portalu se tudi tukaj ob zaprtju prikaže obvestilo "Predor zaprt / Tunnel closed", kar voznikom omogoča pravočasno preusmeritev na izvoz Trojane in s tem izbiro alternativne poti. Slika 2.c prikazuje sočasno aktivacijo vseh treh portalov ob izrednem dogodku v predoru Trojane, zaradi katerega je promet skozi predor onemogočen. Tretji portal je nameščen 0,154 km pred predorom, torej že po izvozu Trojane, kar pomeni, da vozniki na tej točki nimajo več možnosti izbire alternativne poti. Tretji portal prikazuje enako vsebino kot prejšnja portala, "Predor zaprt / Tunnel closed", s čimer voznike pravočasno opozarja na zaporo in omogoča zmanjšanje hitrosti ter varnejšo ustavitev pred oviro.

Napaka! Neveljavno samosklicevanje zaznamka. prikazuje število voznikov, ki zaradi zamude pri aktivaciji obvestila niso pravočasno obveščeni o zaprtju predora, kar omejuje njihovo možnost izbire alternativne poti. Analiza zajema štiri scenarije za vsako aktivacijo, in sicer ročno ter avtomatizirano aktivacijo v jutranji in popoldanski konici.

Rezultati aktivacije prvega portala (Preglednica 3, drugi stolpec) kažejo, da je ob ročni aktivaciji v jutranji konici največ neobveščenih voznikov, 80, medtem ko jih je v popoldanski konici nekoliko manj, 43. Pri avtomatizirani aktivaciji se število neobveščenih zmanjša, saj sistem hitreje posreduje informacije. V jutranji konici je 73 neobveščenih voznikov, v popoldanski pa 39. Podatki jasno kažejo, da avtomatizirana aktivacija portala povečuje učinkovitost obveščanja in večja verjetnost, da se bodo vozniki pravočasno odločili za alternativno pot. S tem se



Slika 5. Skica različnih aktivacij portalov ob izrednem dogodku v predoru Trojane

zmanjšuje tveganje, da bi vozniki dosegli zaporo in se znašli v neoptimalni situaciji. Razlike med jutranjim in popoldanskim prometom dodatno potrjujejo, da gostota prometa vpliva na širjenje informacij in odzivnost voznikov.

Ob aktivaciji dveh portalov (Preglednica 3, tretji stolpec) vidimo, da je število neobveščenih voznikov nekoliko nižje v primerjavi s prvim primerom, saj je drugi portal bližje predoru. Pri ročni aktivaciji ostane v jutranji konici neobveščenih 63 voznikov, v popoldanski pa 34. Avtomatizirana aktivacija to število zmanjša na 56 voznikov v jutranjem in 30 voznikov v popoldanskem prometnem vrhu. Rezultati potrjujejo, da kombinirana uporaba prvega in drugega portala izboljšuje učinkovitost obveščanja. Čeprav se pri drugem portalu število neobveščenih nekoliko zmanjša, ostaja avtomatizirana aktivacija ključna za

pravočasno informiranje voznikov in zmanjšanje nepotrebnih zastojev.

Četrti stolpec Preglednice 3 prikazuje število voznikov, ki zaradi časovnih zamikov prenosa prometnih podatkov do vseh treh prometnih portalov, niso pravočasno obveščeni o zaprtju predora. Rezultati kažejo, da je število neobveščenih voznikov pri aktivaciji vseh treh portalov nekoliko nižje od aktivacije dveh ali enega portala. Pri ročni aktivaciji ostane v jutranji konici neobveščenih 33 voznikov, v popoldanski pa 18 voznikov. Avtomatizirana aktivacija to število zmanjša na 26 voznikov v jutranjem in 14 voznikov v popoldanskem prometnem vrhu.

Rezultati potrjujejo, da aktivacija vseh treh portalov izboljšuje učinkovitost obveščanja. Čeprav se pri aktivaciji vseh treh

Vrsta aktivacije in konična ura	Število nepravočasno obveščenih voznikov (Portal 1)	Število nepravočasno obveščenih voznikov (Portala 1 + 2)	Število nepravočasno obveščenih voznikov (Portali 1 + 2 + 3)
Ročna aktivacija v jutranji konični uri	80	63	33
Ročna aktivacija v popoldanski konični uri	43	34	18
Avtomatizirana aktivacija v jutranji konični uri	73	56	26
Avtomatizirana aktivacija v popoldanski konični uri	39	30	14

Preglednica 3. Število voznikov, ki niso pravočasno obveščeni o izrednem dogodku pri treh različnih aktivacijah portalov pred predorom Trojane

portalov število neobveščenih nekoliko zmanjša, ostaja avtomatizirana aktivacija ključna za pravočasno informiranje voznikov in varnejšo upočasnitev vozil.

4.2 Prenos informacij do mobilne aplikacije Promet+

V tem delu analiza preučuje prenos informacij do mobilne aplikacije Promet+ v dveh scenarijih: v primeru kontinuiranega posodabljanja, pri katerem aplikacija takoj obvesti voznike o morebitni nevarnosti, ter v primeru periodičnega posodabljanja, kjer aplikacija preverja nove informacije sistema vsakih 60 sekund. V obeh primerih, podobno kot za aktivacijo portalov, se bo ocenil vpliv ročne in avtomatizirane aktivacije prenosa informacij ter bo analizirano, koliko voznikov ni pravočasno obveščenih o izrednem dogodku, ob predpostavki, da imajo vsi nameščeno mobilno aplikacijo Promet+, vključeno zvočno opozorilo in ustrezno nastavljen prikaz vizualnih obvestil na mobilni napravi.

voznike (Meglič, 2025). Povprečni časovni zamik ročne aktivacije pri prometnih portalih znaša 34 sekund, pri kontinuirani posodobitvi aplikacije Promet+ pa 27 sekund. Pri avtomatizirani aktivaciji so ti časi krajši, 25 sekund pri portalih in 18 sekund pri aplikaciji Promet+. To potrjuje prednosti avtomatiziranega sistema, ki zmanjšuje zamude pri prenosu informacij.

Podatki potrjujejo, da kontinuirana posodobitev aplikacije Promet+ zagotavlja najvišjo stopnjo obveščanja voznikov. Pri jutranji konični uri ostane neobveščenih le 15 voznikov, pri popoldanski konični uri pa osem voznikov. Nasprotno 60-sekundni interval posodobitev povzroča večjo variabilnost, pri kateri lahko ostane neobveščenih tudi do 71 voznikov. Primerjava rezultatov kaže, da je razlika med ročno in avtomatizirano aktivacijo še posebno izrazita pri prvem prometnem portalu, kjer avtomatizacija zmanjša število neobveščenih voznikov za devet odstotkov. Prav tako je opaziti, da pri kontinuirani posodobitvi aplikacije Promet+ razlika med jutranjo in popoldansko konični uro ni tako izrazita kot pri prometnih portalih, kar kaže na večjo konsistentnost sistema.

Vrsta aktivacije in konična ura	Število nepravočasno obveščenih voznikov (kontinuirana posodobitev)	Število nepravočasno obveščenih voznikov (60-sekundna posodobitev)
Ročna aktivacija v jutranji konični uri	22	71
Ročna aktivacija v popoldanski konični uri	12	38
Avtomatizirana aktivacija v jutranji konični uri	15	63
Avtomatizirana aktivacija v popoldanski konični uri	8	34

Preglednica 4. Izračunane vrednosti za različne scenarije aktivacij vsebin prometnih informacij, ki zajemajo kombinacije ročne in avtomatizirane aktivacije v jutranji in popoldanski konici

Rezultati potrjujejo, da avtomatizirana aktivacija izboljša pravočasnost obveščanja voznikov. Pri ročni aktivaciji v jutranji prometni konici obvestilo ne prejme 22 voznikov, v popoldanski konici pa dvanajst voznikov. Pri avtomatizirani aktivaciji pa obvestila ne prejme 15 voznikov v jutranji in osem voznikov v popoldanski konični uri. Pri 60-sekundni posodobitvi aplikacije je več nepravočasno obveščenih voznikov v primerjavi z avtomatizirano aktivacijo. V jutranji konici pri ročni aktivaciji obvestila pravočasno ne prejme približno 71 voznikov, v popoldanski konici pa 38 voznikov. Pri avtomatizirani aktivaciji se to število zmanjša na 63 voznikov v jutranji konici in na 34 voznikov v popoldanski konici, kar kaže na boljšo učinkovitost avtomatiziranega sistema.

5 DISKUSIJA

Glavni cilj raziskave je bil oceniti učinkovitost ITS- in C-ITS-sistemov glede na časovne zamike pri prenosu prometnih informacij in dostopnost obvestil za voznike. Upoštevana sta bila tako ročni kot avtomatizirani način aktivacije prometnih obvestil, pri čemer analiza temelji na podatkih iz RNC Vransko za izbran delovni dan, 16. oktober 2024, ki odraža običajne prometne razmere brez prisotnosti izrednih dogodkov.

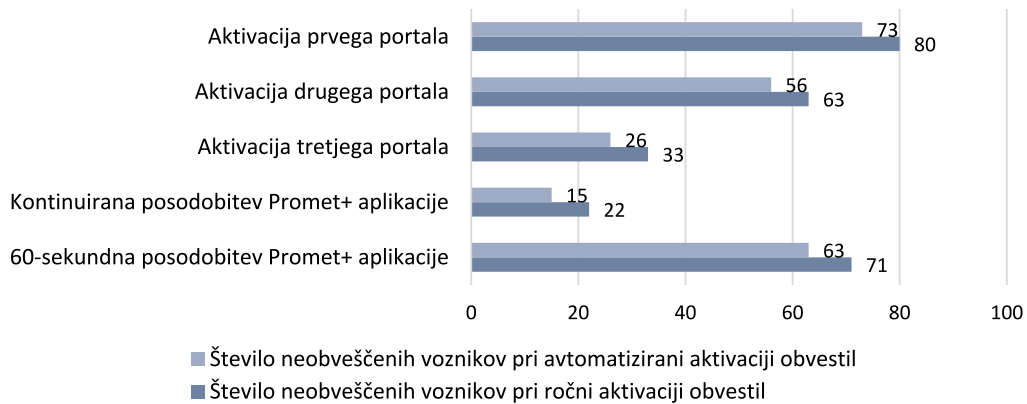
Rezultati kažejo, da avtomatizirana aktivacija bistveno skrajša časovni zamik obveščanja, kar lahko zmanjšuje tveganje za

Dodatno se izkaže, da razlika med kontinuirano posodobitvijo in 60-sekundno posodobitvijo aplikacije Promet+ ni zanemarljiva, saj se število neobveščenih voznikov pri daljšem intervalu posodobitev lahko več kot potroji. To nakazuje, da bi bilo za učinkovitejše obveščanje smiselno uvesti dinamično prilagajanje intervala posodobitev, kjer bi aplikacija zaznavala prometno gostoto in temu primerno posodabljala podatke hitreje v kritičnih razmerah.

Slika 6 jasno prikazuje, da avtomatizirana aktivacija zmanjša število neobveščenih voznikov v vseh primerih, pri čemer je razlika najbolj izrazita pri prvem portalu, kjer se število neobveščenih voznikov zmanjša z 80 na 73.

Ugotovitve kažejo, da najboljše rezultate dosega kombinacija avtomatizirane aktivacije in kontinuirane posodobitve aplikacije Promet+, saj to zagotavlja najhitrejšo in najzanesljivejšo obveščanje. Poleg tega se je oddaljenost prometnih portalov od kritičnega območja izkazala za pomemben dejavnik, saj zmanjšuje razpoložljiv čas za odziv voznika, zlasti v pogojih gostega prometa ali slabe vidljivosti. To pomeni, da integracija avtomatiziranih sistemov in optimizacija lokacije portalov lahko dodatno izboljša prometno varnost in zmanjša tveganje za prometne zastoje ter nalete.

Analiza vpliva frekvence posodobitev obvestil mobilne aplikacije Promet+ je pokazala, da so pogostejše posodobitve ključ-



Slika 6. Primerjava števila neobveščenih voznikov pri ročni in avtomatizirani aktivaciji obvestil v jutranji konični uri

nega pomena za zmanjšanje števila neobveščenih voznikov. Čeprav 60-sekundni interval posodobitev zagotavlja pravočasno obveščanje na odprtih odsekih avtoceste, se v dinamičnih prometnih razmerah izkaže za premalo odzivnega. Za izboljšanje odzivnosti bi bilo smiselno implementirati dinamično prilagajanje intervala posodobitev, ki bi omogočilo hitrejši prenos informacij in zmanjšalo število neobveščenih voznikov, zlasti na kritičnih odsekih, kot so predori in območja pogostih zastojev. Skrajšanje intervala na sedem sekund bi omogočilo, da metoda obveščanja doseže enako časovno učinkovitost kot prometni portali, kar bi dodatno izboljšalo odzivnost C-ITS-sistema in povečalo prometno varnost.

Priporoča se kombinacija uporabe ITS- in C-ITS-sistemov, saj imata oba sistema svoje prednosti in slabosti in se dopolnjujeta. Prometni portali so učinkoviti, vendar omejeni na določene avtocestne odseke, medtem ko C-ITS omogoča širše in zgodnejše opozarjanje na celotnem avtocestnem omrežju. Aplikacija Promet+ se posebno izkaže v slabih vremenskih razmerah, saj voznik prejme obvestilo neposredno na zaslon mobilne naprave, kar zmanjša tveganje spregledanih obvestil.

Kljub prednostim sistema C-ITS pa ta ne more v celoti nadomestiti prometnih portalov. Njegova učinkovitost je odvisna od pokritosti mobilnega omrežja, kar lahko v predorih in območjih s šibkim signalom vpliva na pravočasnost obveščanja. Poleg tega vsi vozniki ne uporabljajo mobilnih aplikacij ali med vožnjo ne posvečajo pozornosti obvestilom, kar zmanjšuje doseg sistema v realnih prometnih razmerah. Ena od možnih rešitev za izboljšanje delovanja sistema v predorih oziroma v bližini predorov bi bila uporaba repetitorjev ali prilagojene infrastrukture za zagotavljanje stabilne komunikacijske povezave.

6 SKLEP

Inteligentni transportni sistemi (ITS) in kooperativni inteligentni transportni sistemi (C-ITS) predstavljajo ključen tehnološki napredek na področju upravljanja prometa in zagotavljanja varnosti na cestah. Tradicionalni ITS-sistemi, ki temeljijo na občestni infrastrukturi, zagotavljajo obveščanje voznikov prek prometnih portalov in drugih signalizacijskih sredstev, vendar jih omejujejo časovni zamiki pri prenosu informacij ter potreba voznikov po vizualni prepoznavi sporočil. Nasprotno pa C-ITS-sistemi omogočajo neposredno komunikacijo med in-

frastrukturo in vozili, kar povečuje hitrost in zanesljivost prenosa prometnih informacij.

Prispevek raziskave k področju prometnega upravljanja je v empirični oceni učinkovitosti obstoječih sistemov obveščanja in kvantifikaciji njihovih časovnih zamikov. Analiza podatkov podjetij DARS, d. d., in Realis Ltd. je preučila vpliv hitrosti prenosa prometnih informacij na pravočasno obveščanje voznikov o izrednih dogodkih na avtocestnem odseku pred predorom Trojane v smeri proti Ljubljani. Raziskava je primerjala dva komplementarna sistema: tradicionalni ITS-sistem s prometnimi portali in C-ITS-sistem, ki temelji na mobilni aplikaciji Promet+. Rezultati so pokazali, da kontinuirano posodabljanje informacij v realnem času zagotavlja znatno večjo pravočasnost obveščanja voznikov. Pri uporabi mobilne aplikacije je neobveščenih ostalo le 15 voznikov v jutranji in osem voznikov v popoldanski konični uri, medtem ko je bil ta delež neobveščenih voznikov pri prometnih portalih bistveno višji. Ugotovitve torej potrjujejo, da C-ITS-sistemi omogočajo hitrejši in učinkovitejši prenos informacij v primerjavi s tradicionalnimi ITS-rešitvami.

Glavne ugotovitve raziskave potrjujejo, da C-ITS omogoča boljšo prilagodljivost in hitrejšo odzivanje na prometne razmere. Mobilna aplikacija Promet+ s kontinuiranim posodabljanjem je zagotovila hitrejšo obveščanje v primerjavi z občestnimi portali, kar prispeva k zmanjšanju zastojev in izboljšanju prometne varnosti.

Kljub obetavnim rezultatom pa ima raziskava določene omejitve. Eden ključnih izzivov je odvisnost C-ITS-sistema od kakovosti mobilnega omrežja, saj lahko pomanjkljiva pokritost vpliva na zanesljivost prenosa podatkov. Prav tako raziskava ni zajela širših vedenjskih vidikov uporabnikov, kot so odzivi voznikov na različne načine obveščanja in stopnja sprejetosti mobilnih aplikacij. Nadaljnje raziskave bi morale vključevati tudi vpliv različnih tipov prometnih dogodkov in vremenskih pogojev na delovanje sistema.

Za učinkovito naslavljanje omenjenih izzivov bi bilo smiselno v nadaljnjih raziskavah eksperimentalno testirati dinamično prilagoditev intervala posodobitev informacij glede na prometne in vremenske razmere. To pomeni, da bi se prometna aplikacija v kritičnih območjih, kot so predori ali cestni odseki z visoko stopnjo nesreč, posodabljala v krajših časovnih intervalih kot na drugih območjih. Prav tako bi razvoj prediktivnih modelov,

ki temeljijo na metodah umetne inteligence in analizi zgozgovinskih prometnih podatkov, lahko omogočil natančnejše napovedovanje prometnih tveganj. Takšni pristopi omogočajo identifikacijo kompleksnih in nelinearnih vzorcev v prometnih podatkih, ki jih klasične analitične metode težje zajamejo, kar je posebno relevantno pri spremenljivih prometnih in okoljskih razmerah. Na tej osnovi bi bilo mogoče podpreti tudi avtomatizirano aktivacijo preventivnih opozoril. S tem bi se lahko izboljšali prometna varnost in pretočnost, hkrati pa bi se potencialno zmanjšal vpliv izrednih dogodkov na prometni tok.

Dolgoročno bi bila v Sloveniji ključna celovita integracija hibridne komunikacije C-ITS-sistema z obstoječimi ITS-sistemi, ob hkratnem izboljšanju prometne infrastrukture in razvoju naprednih prediktivnih modelov. S tem bi se povečali pravčasnost in natančnost prometnih informacij, optimizirala odzivnost na izredne dogodke ter izboljšali varnost in pretočnost prometa na avtocestnem omrežju.

7 LITERATURA

Aplikacija Promet+, <https://www.promet.si/sl/aplikacija-promet>, 2026.

Asselin-Miller, N., Biedka, M., Gibson, G., Kirsch, F., Hill, N., White B., Uddin, K., Study on the Deployment of C-ITS in Europe: Final Report, Ricardo Energy & Environment, London, UK, 2016.

Austrian Government, Intelligent Transport Systems (ITS), Cooperative ITS and telematics, Department of Infrastructure, Transport, Regional Development, Communications and the Arts, 2024, <https://www.infrastructure.gov.au/infrastructure-transport-vehicles/transport-strategy-policy/office-future-transport-technology/intelligent-transport-systems-its-cooperative-its-and-telematics>

Böhm, M., Flechl, B., Menzel, G., Pfliegl, R., Russ, M., Zwick, K., Matiassek, F., Molin, H., Schwammenhöfer, F., IVS-Aktionsplan Österreich: Strategie zur Umsetzung eines Intelligenten Verkehrssystems in Österreich, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie – BMVIT, Dunaj, 2011.

Cerritos College, Japanese ITS - CACS, Cerritos College, <https://www.cerritos.edu/auto/its/jitsc.htm>, 2024.

Chowdhury, M. Sadek, A., What is ITS?, <https://rno-its.piarc.org/en/intelligent-transport-systems/what-its>, 2026.

C-ITS: Cooperative Intelligent Transport Systems and Services, CAR 2 CAR, <https://www.car-2-car.org/about-c-its>, 2024.

Deveci, M., Gokasar, I., Pamucar, D., Zaidan, A. A., Wen, X., Gupta, B. B., Evaluation of Cooperative Intelligent Transportation System scenarios for resilience in transportation using type-2 neutrosophic fuzzy VIKOR, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 172, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103666>, 2023.

Federal Ministry for Transport, Innovation and Technology, C-ITS Strategy Austria, Vienna, 2016.

Ferrante, E., Giamarelos, O., ITS Reference Handbook for harmonized ITS Core Service Deployment in Europe. European

ITS Platform, Retrieved from https://www.its-platform.eu/wp-content/uploads/ITS-Platform/AchievementsDocuments/ReferenceHandbook/EUEIP-ReferenceHandbook_accessible.pdf, 2021.

Garg, T, Kaur, G., A Systematic Review on Intelligent Transport Systems, Journal of Computational and Cognitive Engineering, Vol. 2(3), p. 175-188, 2022.

Ghahremannezhad, H., Chengjun c Liu, Traffic Surveillance Video Analytics: A Concise Survey, In Ghahremannezhad Hadi & Chengjun Liu (Eds.), Researchgate. New York, USA, Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/362366364_Traffic_Surveillance_Video_Analytics_A_Concise_Survey, 2022.

Ghori, M. R., VANET Routing Protocols: Review, Implementation and Analysis, Journal of Physics: Conference, 2018.

ASECAP, Asecap C-ITS Manifesto, Brusel, 2021.

ISO 21217:2020(en), Online Browsing Platform, 2020, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:21217:ed-3:v1:en>

Lantech Communications Global, Intelligent Transportation System, Lantech Communications Global, <https://www.lantechcom.tw/global/eng/solutions-ITS.html>

3212 - Radijska postaja in njena frekvenca, ki predvaja prometne in turistične informacije., MEBL Signalizacija, 2024.

Meglič, I., Šraml, M., Zorin, U., Gruden, C., The Impact of Time Delays in Traffic Information Transmission Using ITS and C-ITS Systems: A Case-Study on a Motorway Section Between Two Tunnels, Vehicles 2025, <https://www.mdpi.com/2624-8921/7/4/107>, 2025

Ministry of Land, Infrastructure and Transport, About C-ITS, C-ITS Pilot Project, Cooperative Intelligent Systems, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea Expressway Corporation Research Institute, 2024. <https://www.c-its.kr/english/introduction.do>, 2024.

Njord, J., Peters, J., Freitas, M., Warner, B., Allred, K. C., Bertini, R. L., Warne, T., Safety applications of intelligent transportation systems in Europe and Japan. Washington, DC, 2006.

Nowacki, G., Development and Standardization of Intelligent Transport Systems, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 6, No. 3, 2012.

Pinkelnig, A., Gruber, D. A., C-ROARS Annual pilot overview report 2022. <https://www.c-roads.eu/documents/public-documents/>, 2023.

Summala, H., Brake Reaction Times and Driver Behavior Analysis, Transportation Human Factor, pp. 217-226, 2000.

Weber, J. S., Neves, M., Ferreto, T., VANET simulators: an updated review, Journal of the Brazilian Computer Society, 2021.

Zorin, U., Spremenljiva prometno informativna signalizacija - Dars, <https://www.yumpu.com/xx/document/read/50858538/spremenljiva-prometno-informativna-signalizacija-dars/3>, 2026.



Eva Munda, mag. inž. grad.

eva.munda1@student.um.si

Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo

Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

eva@stajerski-inzeniring.com

Štajerski Inženiring, d. o. o.

Tržaška cesta 85, 2000 Maribor



Živa Hanžič, M. Sc. REAP

ziva@stajerski-inzeniring.com

Štajerski Inženiring, d. o. o.

Tržaška cesta 85, 2000 Maribor



izr. prof. dr. Janja Kramer Stajnko, univ. dipl. inž. grad.

janja.kramer@um.si

Univerza v Mariboru

Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo

Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija



Strokovni članek

UDK/UDC: 556.18:696.135:004.42

ANALIZA RAZLIČNIH METOD DIMENZIONIRANJA METEORNE KANALIZACIJE NA PRAKTIČNEM PRIMERU

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR STORMWATER SEWER SYSTEM DESIGN ON A PRACTICAL CASE STUDY

Povzetek

Prispevek obravnava analizo različnih metod dimenzioniranja meteorne kanalizacije na praktičnem primeru logističnega centra. Pri tem so bile obravnavane naslednje hidrološke metode: racionalna metoda, modificirana racionalna metoda, racionalna metoda DeKalb, Santa Barbara UH, SCS TR-55 in SWMM. Namen raziskave je bil ovrednotiti vpliv izbire hidrološke metode na rezultate hidravličnega dimenzioniranja sistema. Modeliranje je bilo izvedeno s programskima orodjema Civil 3D in Storm and Sanitary Analysis (SSA), pri čemer so bile uporabljene različne metode za določanje odtoka padavinskih voda. V okviru analize so bili primerjani hidrogrami odtoka, izračunani maksimalni pretoki, hitrosti, dimenzije cevododov in izpolnjenosti cevi. Rezultati kažejo, da izbira metode vpliva na končne rezultate, pri čemer so bila ugotovljena opazna odstopanja med posameznimi metodami izračuna časov koncentracij in hidrološkimi metodami. Te razlike lahko pomembno vplivajo na varnost delovanja sistema in na stroške izvedbe. Pri načrtovanju meteorne kanalizacije je potrebna kritična presoja izbire metode glede na velikost, rabo in kompleksnost obravnavanega območja. Prispevek podaja tudi praktična priporočila za uporabo posameznih metod v inženirski praksi.

Ključne besede: odvajanje odpadnih voda, meteorna kanalizacija, metode dimenzioniranja kanalizacije, hidrologija

Summary

This article presents an analysis of stormwater sewer design methods based on a practical case study of a logistics centre. The following hydrological methods were considered: rational method, modified rational method, DeKalb rational method, Santa Barbara UH, SCS TR-55 and SWMM. The aim of the study was to evaluate the impact of the selected hydrological method on the results of hydraulic design. The modelling was carried out using Civil 3D and Storm and Sanitary Analysis (SSA), applying various approaches for estimating stormwater runoff. As part of the analysis, runoff hydrographs, calculated peak flows, velocities, pipe dimensions, and pipe filling ratios were compared. The results show that the choice of method affects the final outcomes, with noticeable deviations identified among different methods for calculating time of concentration and among hydrological methods. These differences can significantly influence both the operational safety of the system and construction costs. In storm sewer design, a critical assessment of method selection is necessary, considering the size, land use, and complexity of the area under consideration. The article also provides practical recommendations for the application of individual methods in engineering practice.

Key words: wastewater drainage, storm sewer, sewer dimensioning methods hydrology

1 UVOD

Človekova prisotnost in urbanizacija imata velik vpliv na značilnosti zemeljskega površja. Naravne površine, kot sta vegetacija in prepustna zemljina, skozi kateri se padavinska voda naravno infiltrira, se nadomeščajo z neprepustnimi ali delno prepustnimi materiali. Takšne spremembe zmanjšajo infiltracijsko sposobnost tal ter skrajšajo čas koncentracije padavinske vode. Posledično se povečajo konični pretoki in celotni volumen površinskega odtoka. Meteorna kanalizacija je ključen del komunalne infrastrukture, saj omogoča odvodnjavanje padavinskih voda in s tem zmanjšuje tveganje za poplave in druge negativne vplive na urbano okolje.

Pri projektiranju meteorne kanalizacije se uporabljajo različne metode za določanje hidravličnih obremenitev, katerih izbira lahko pomembno vpliva na rezultate dimenzioniranja. V sodobni praksi se za ta namen pogosto uporablja programska oprema, kot je Autodesk Storm and Sanitary Analysis (SSA), ki omogoča izvajanje hidravličnih simulacij po več različnih metodoloških pristopih. Na konkretnem primeru logističnega centra je bila zato izvedena primerjalna analiza metod dimenzioniranja meteorne kanalizacije z namenom ovrednotenja vpliva izbire metode na končne rezultate preračunov.

Prispevek predstavlja povzetek magistrske naloge [Munda, 2025], ki celovito obravnava analizo različnih metod dimenzioniranja meteorne kanalizacije na širšem območju novega logističnega centra. Osrednji cilj raziskave je bil ugotoviti vpliv izbire metode na rezultate hidravličnega preračuna ter na izbor ustreznih premerov cevi kanalizacijskega sistema. Hkrati je bila preverjena hipoteza, da je v praksi najpogosteje uporabljena racionalna metoda tudi najbolj optimalna z vidika zanesljivosti in uporabnosti rezultatov.

2 UPORABLJENE METODE IN PRAKTIČNI PRIMER

Metode dimenzioniranja meteorne kanalizacije so bile analizirane na praktičnem primeru Logističnega parka Logatec. Projekt se je projektiral v letih 2023-2024, njegova izvedba pa je bila zaključena v letu 2025. Slika 1 prikazuje objekt in zunanjo ureditev v zaključni fazi gradnje.

2.1 Opis primera

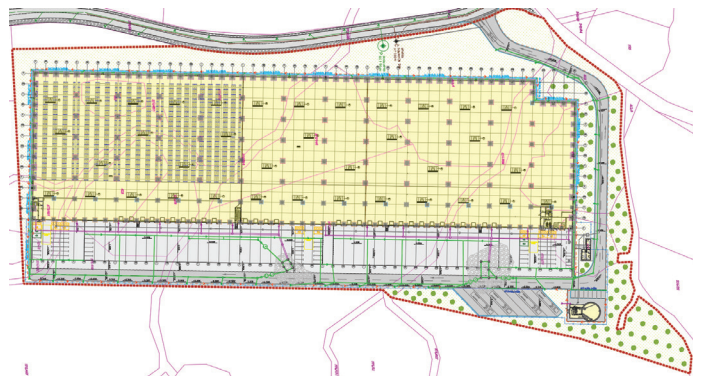
Obrađevano območje je bilo pred gradnjo nepozidano, z značilnim kraškim terenom in brez obstoječe infrastrukture. Predvidena ureditev je vključevala gradnjo logističnega objekta z nakladalnimi rampami, pripadajočimi pisarniškim in tehničnimi prostori ter celovito zunanjo ureditvijo. Ta obsega prometno infrastrukturo, parkirne površine za osebna in tovorna vozila ter priključitev na gospodarsko javno infrastrukturo. Poseben poudarek je na ureditvi utrjenih, večinoma nepropustnih površin, ki pomembno vplivajo na odtok padavinskih voda.

Sistem odvajanja padavinskih voda na obravnavanem območju je zasnovan kot ločen kanalizacijski sistem, ki vključuje odvodnjavanje strešnih in manipulativnih površin. Na Sliki 3 je prikazan meteorni kanalizacijski sistem – z vijolično barvo od-



Slika 1. Logistični park Logatec proti koncu gradnje

vodnjavanje strešnih površin in z zeleno barvo odvodnjavanje manipulativnih površin. Meteorne vode s prometnih in manipulativnih površin se zbirajo ter mehansko obdelajo v usedalnikih in lovilnikih olj, nato pa se očiščene odvajajo v ponikalne jaške. Padavinske vode s strešin se preko vertikal in peskolovov prav tako vodijo v ponikalne jaške. Sistem sestavljajo tudi točkovni in linijski požiralniki ter betonske kanalete ustreznih dimenzij in nosilnosti, prilagojeni prometnim obremenitvam. Betonske kanalete so bile predvidene po obodu servisne poti okrog objekta (na Sliki 2 so prikazane s svetlo modro barvo), ker je objekt spušen nižje glede na zgornjo javno cesto in je treba površinske padavinske vode, ki pritečejo po strmih brežinah, kontrolirano zajeti.



Slika 2. Situacija meteorne odvodnje

Odvodnjavane površine so različnih hrapavosti, naklona, sestave in prepustnosti. Razdelimo jih lahko na tri tipe prispevnih površin:

- utrjene neprepustne površine – asfaltna in betonska s koeficientom odtoka 0,8 do 0,9,
- površine streh s koeficientom odtoka 0,9 do 1,0,
- zazelenjene in kamnite brežine s koeficientom odtoka 0,1 do 0,3.

Posebna pozornost je bila namenjena varstvu voda, saj je bil celoten kanalizacijski sistem cevi in jaškov predviden kot vodotesen skladno z veljavnimi smernicami. V primeru požara je izveden nadzorovan sistem zapiranja, ki preprečuje odtok onesnaženih požarnih voda v ponikalni sistem in omogoča njihovo zadrževanje ter ustrezno ravnanje.

2.2 Uporabljene metode

Pri dimenzioniranju meteorne kanalizacije se najprej lotimo modeliranja padavin in odtoka. Pri tem določimo prispevne površine in čas koncentracije.

2.2.1 Čas koncentracije

Padavine, ki padejo na prispevno površino, ne odtečejo takoj v kanal. Čas, v katerem dosežejo kanal, je odvisen od naklona in hrapavosti površine, oddaljenosti od kanala in od intenzitete padavin [Kolar, 1983].

V SSA je za izračun časa koncentracije na voljo več različnih metod:

- Kirpich,
- Carter,
- Eagleson,
- FAA,
- Harris County,
- Papadakis-Kazan,
- SCS TR-55.

Metoda po Kirpichu (1940) je bila razvita za manjše prispevne površine iz podatkov s šestih manjših območij v Tennesseeju v ZDA, velikih 0,0051–0,433 km² in z naklonom 3–12 %. Upošteva dolžino toka od najbolj oddaljene točke do iztoka in povprečni vzdolžni naklon. Podobno enačbo je razvil Carter (1961), ta se nanaša na manjše naravne vodotoke v ZDA in njihove prispevne površine, ki so manjše od 21 km² (8 mi²) [D. Sultan, 2022].

Eagleson (1962) in kasneje Nicklow et al. (2006) so razvili enačbo, ki je prav tako primerna za vodotoke in prispevne površine, manjše od 21 km² (8 mi²), in zraven dolžine toka upošteva od najbolj oddaljene točke do iztoka še Manningov koeficient hrapavosti in hidravlični radij v glavnem kanalu vodotoka, ko je ta poln. Metoda po FAA (1970) je bila razvita na podlagi podatkov odtoka s površin manjšega letališča, ki jih je zbrala USACE (U.S. Army Corps of Engineers). Po navadi preceni čas dotoka, če ima pot dotoka znaten delež plitvega koncentriranega toka. Enačba upošteva dolžino toka od najbolj oddaljene točke do

iztoka v kanalizacijski sistem, povprečni vzdolžni naklon in koeficient odtoka (po racionalni metodi, ki je opisana v poglavju 2.2.2) [Salimi, 2016].

Harris County Engineering Department, Teksas [Harris County Engineering Department, 2018], je za izračun časa koncentracije predpisal enačbo, ki je odvisna samo od velikosti prispevne površine.

Papadakis-Kazanova (1986) metoda je bila razvita na podlagi podatkov USDA Agricultural Research Service za 84 majhnih podeželskih povodij. Čas koncentracije je odvisen od dolžine površinskega toka, koeficienta hrapavosti, naklona površine in intenzitete padavin [Salimi, 2016].

Po metodi SCS TR-55 se končni čas koncentracije izračuna kot vsota časov potovanja vode različnih vrst toka, kot so površinski tok, plitvi koncentriran tok in kanalski tok (tok po odprtem kanalu, npr. po kanaletih). Za površinski tok se upoštevajo dolžina toka, Manningov koeficient hrapavosti, 24-urni naliv pri dvoletni povratni dobi in naklon površine. Za plitvi koncentriran tok in kanalski tok enačba upošteva dolžino toka glede na povprečno hitrost toka [Autodesk Inc., 2025].

Izvedena je bila analiza obravnavanega meteorne sistema, kjer smo primerjali čase koncentracije in odtoke s površine glede na različne metode izračuna časa koncentracije. Celotno območje je bilo razdeljeno na 115 prispevnih površin. V nadaljevanju za nazornejši pregled obravnavamo samo tri različne prispevne površine. Za izračun odtoka je bila v tem primeru uporabljena racionalna metoda. Preglednica 1 prikazuje primerjavo in rezultate različnih časov koncentracije in odtoka. Vključeni so tudi rezultati po izračunu SWMM (Storm Water Management Model). Intenziteta padavin je bila pri izračunu odtoka po racionalni metodi določena na podlagi časa koncentracije, ki je enak času trajanja padavin. V program SSA smo vnesli ITP-krivulje (Slika 3), na podlagi katerih program določi intenziteto padavin glede na trajanje padavin oziroma čas koncentracije.

Lahko opazimo, da so rezultati po metodah Carter, Kirpich, Papadakis-Kazan enaki, veliko odstopanje pa je pri metodi po Harris County. Model SWMM uporablja največ parametrov za izračun časa koncentracije, zato lahko smatramo, da daje najbolj natančne rezultate. Čas koncentracije je za bolj hrapave površine daljši kot za gladke. Enako je daljši v primeru manjšega naklona površine in daljše dolžine toka po prispevni površini.

Oznaka	Površina [m ²]	Vtok v sistem	Povprečni naklon [%]	Dolžina toka [m]	Čas koncentracije [hh:mm:ss]				Odtok [l/s]			
					Carter, Kirpich, Papadakis-Kazan	FAA	Harris County	SWMM	Carter, Kirpich, Papadakis-Kazan	FAA	Harris County	SWMM
ASFALT_36	1036,74	L11	1,0	18,0	00:05:00	00:05:40	00:22:52	00:03:15	30,74	28,94	15,59	43,78
BREZINA_15	924,01	PE1.5	40,0	30,0	00:05:00	00:05:00	00:22:42	00:08:58	11,91	11,91	4,34	8,01
STREHA_02	2059,66	O.2	2,0	24,0	00:05:00	00:05:00	00:23:52	00:02:58	61,07	61,07	32,74	87,92

Preglednica 1. Prikaz primerjave različnih časov koncentracije in odtoka

2.2.2 Hidrološke metode

Po izračunu časa koncentracije uporabimo izbrano hidrološko metodo. V nadaljevanju so predstavljene hidrološke metode, ki jih je mogoče izbrati v programu SSA za dimenzioniranje meteorne kanalizacije:

- racionalna metoda,
- modificirana racionalna metoda,
- racionalna metoda DeKalb,
- SCS TR-20,
- SCS TR-55,
- Santa Barbara UH,
- HEC-1,
- EPA SWMM.

Racionalna metoda je splošno znana, enostavna, hitra in daje oceno koničnega odtoka s prispevne površine pri padavinah s stalno intenziteto. Izpeljana je na podlagi sledečih predpostavk:

- intenziteta dežja je stalna po času in kraju,
- frekvenca koničnega odtoka je enaka frekvenci padavin, ki jo povzroča,
- razmerje med količino padavin in odtokom je linearno,
- vsaka od spremenljivk je neodvisna in določena ločeno,
- hitrost potovanja vala po omrežju je enaka hitrosti pri polni cevi,
- koeficient odtoka oz. infiltracija je neodvisna od časa trajanja padavin, od intenzitete padavin in od predhodne vlažnosti. [Kompere, 1991].

Racionalna metoda je torej klasična metoda za izračun največjega pretoka, ki se uporablja pri dimenzioniranju kanalizacije. Izračuna se na podlagi velikosti prispevne površine, koeficienta odtoka in intenzitete oz. jakosti naliva, ki se določi iz ITP-krivulje (intenziteta – trajanje – povratna doba) glede na čas koncentracije posamezne prispevne površine.

Modificirana racionalna metoda vključuje osnovni princip racionalne metode in obenem generira hidrogram. Hidrogram $Q(t)$ je časovna porazdelitev pretoka, kjer je mogoče razbrati, kako hitro pride do konice pretoka, kolikšen je skupni volumen odtoka in kako dolgo traja odtok.

Racionalno metodo DeKalb je razvil DeKalb County Public Works Department, Decatur, Georgia, ZDA. Racionalna metoda DeKalb oblikuje projektni hidrogram tako, da porazdeli konični pretok (računan po racionalni metodi) skozi čas, z uporabo dimenzijskega enotnega hidrograma. Z uporabo te metode lahko dimenzioniramo tudi zadrževalne bazene in akumulacije [CivilGEO Inc., 2026].

Metodi The Soil Conservation Service (SCS) TR-20 in TR-55 sta razširjena hidrološka modela, ki ju je razvila USDA Natural Resources Conservation Service (NRSC, prej SCS). Ti metodi ocenjujeta površinski odtok glede na padavine, rabo zemljišča in značilnosti površine, zato sta pomembni pri zasnovi meteornih sistemov, objektov za nadzor poplav in načrtov za upravljanje s padavinsko vodo [CivilGEO Inc., 2026].

Metoda urbanega hidrograma (UH) Santa Barbare, tako kot SCS, temelji na pristopu številke krivulj (CN) in uporablja enake

enačbe za izračun infiltracije skozi tla in odtoka. To metodo je razvil Okraj za nadzor poplav in ohranjanje voda v okrožju Santa Barbara v Kaliforniji (Santa Barbara County Flood Control and Water Conservation District) [Autodesk Inc., 2025].

Model HEC-1 je primeren za večja povodja ali kompleksne sisteme in je zasnovan za simulacijo odziva površinskega odtoka v porečju reke na padavine tako, da porečje predstavlja kot medsebojno povezan sistem hidroloških in hidravličnih komponent. Metoda HEC-1 v SSA omogoča generiranje hidrograma iz podanega naliva, pri čemer upošteva transformacijo padavin v odtok, učinke zadrževanja in prenos pretoka po kanalih. Je robustna metoda za večja območja in dinamično analizo odtoka padavinske vode [Hydrologic Engineering Center, 1998].

Storm Water Management Model je bil razvit na zahtevo Environmental Protection Agency v konzorciju Metcalf and Eddy Inc., Univerze na Floridi in Water Resources Engineers Inc. SWMM je simulacijski model, ki lahko obravnava kvantiteto in kvaliteto. Model vsebuje račun površinskega odtoka, račun sušnih odtokov v ločeni in/ali mešani kanalizaciji, infiltracijo, račun toka v ceveh z Manningovo in retenzijsko-kontinuitetno enačbo ali s Saint-Venantovimi enačbami [Kompere, 1991].

2.2.3 Hidravlične metode

Pri obravnavi toka vode v ceveh, kanalih in objektih uporabljamo hidravlične metode analize. Ko poznamo odtok s površine (hidrologija), preverimo, ali cev prenese ta pretok, kakšni sta gladina in hitrost v cevi.

Hidravlične metode uporabljajo za tok s prosto gladino Manningovo enačbo za povezavo pretoka z globino vode in naklonom cevi. Za izračun toka pod tlakom se namesto nje uporablja enačba Hazen-Williams ali Darcy-Weisbach. Tok v kanalu ali cevi urejajo Saint-Venantove enačbe ohranjanja mase in gibalne količine za postopno spreminjanje se nestalni tok. Programska oprema SSA omogoča izbiro stopnje kompleksnosti, ki se uporablja za reševanje teh enačb. Privzeta hidravlična metoda je metoda kinematičnega vala. V programu je možno izbrati tudi metodo stalnega enakomernega toka in metodo hidrodinamičnega vala [Autodesk Inc., 2023].

Metoda hidrodinamičnega vala rešuje celotne Saint-Venantove enačbe in omogoča najbolj natančno simulacijo, saj upošteva akumulacijo, povratne vplive, tlačni tok, obrat toka ter kompleksne omrežne konfiguracije. Kinematični val, ki je privzeta metoda v SSA, temelji na poenostavljeni obliki enačb in je primeren za enostavnejša razvejena omrežja, vendar ne upošteva povratnih vplivov in tlačnega toka. Metoda stalnega enakomernega toka predstavlja najbolj poenostavljen pristop, primeren predvsem za predhodne analize velikih omrežij ali dolgoročne simulacije, saj ne upošteva časovnih in dinamičnih učinkov toka [Autodesk Inc., 2023].

2.3 Modeliranje

V programu SSA je mogoče modelirati naslednje elemente odvodnje:

- kanalizacijske cevi in jaški,
- prispevne površine,

- vtoki in zadrževalne površine,
- zadrževalni bazeni,
- kompleksne iztočne konstrukcije,
- razdelilniki pretoka - razbremenilniki, prelivi, odprtine, jezovi in ventili,
- črpalke in črpalne postaje,
- reke, potoki in jarki,
- prepusti in mostovi.

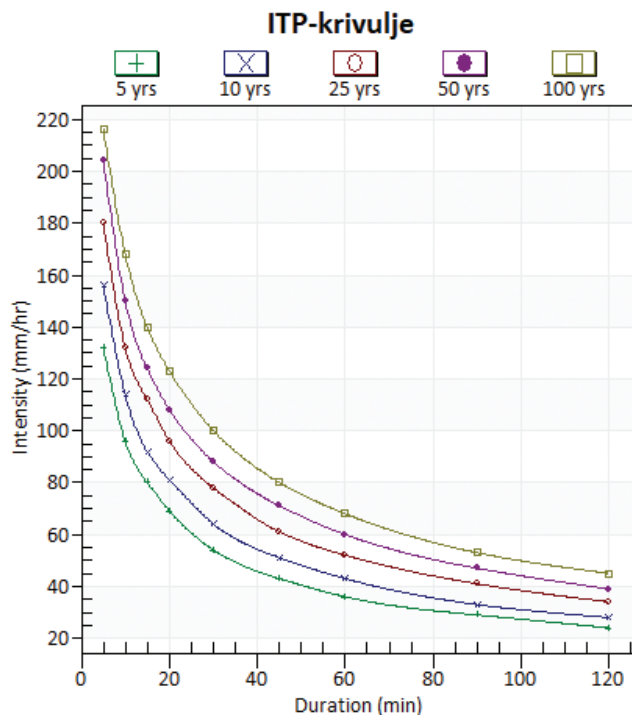
Sistem jaškov, požiralnikov in cevi je bil modeliran v programu Civil 3D 2024 (Autodesk) v koordinatnem sistemu D96 glede na predvidene nove površine in višine terena. Model kanalizacije je bil nato prek ukaza »Edit in Storm and Sanitary Analysis« prenesen v SSA, pri čemer je za izmenjavo podatkov mogoče uporabiti tudi datoteke Hydraflow Storm Sewers STM ali LandXML. Prispevne površine so bile grafično določene in opredeljene z ustreznimi lastnostmi SSA.

Podatki o padavinah so pridobljeni s spletne strani CrossRisk - povratne dobe za ekstremne padavine za območje Logatca, kar prikazuje Preglednica 2.

mm	5 let	10 let	25 let	50 let	100 let	250 let
5 min	11	13	15	17	18	20
10 min	16	19	22	25	28	32
15 min	20	23	28	31	35	41
20 min	23	27	32	36	41	47
30 min	27	32	39	44	50	58
45 min	32	38	46	53	60	70
60 min	36	43	52	60	68	79
90 min	43	50	61	70	80	94
2 h	48	56	68	78	89	105
3 h	56	66	79	90	103	120
4 h	62	73	88	100	113	132
5 h	68	79	94	107	121	141
6 h	73	84	100	113	127	147
9 h	85	97	114	128	143	164
12 h	94	107	125	139	155	177
15 h	101	115	133	148	164	187
18 h	108	122	141	157	173	196
24 h	118	133	154	171	188	212
48 h	146	165	189	209	228	256
72 h	164	185	213	234	255	285
96 h	178	201	230	253	276	308
120 h	190	213	245	269	293	326

Preglednica 2. Količina padavin za območje Logatca glede na povratne dobe [CROSSRISK, Povratne dobe za ekstremne padavine, 2026]

Podatke smo pretvorili v ITP-krivulje (intenziteta - trajanje - povratna doba), ki jih prikazuje Slika 3.



Slika 3. ITP-krivulje za območje Logatca (prikaz iz programa SSA)

Izvedli smo dimenzioniranje kanalizacijskega sistema za desetletno povratno dobo po naslednjih hidroloških metodah:

- racionalna metoda,
- modificirana racionalna metoda,
- racionalna metoda DeKalb,
- Santa Barbara UH,
- SCS TR-55,
- SWMM.

Kanalizacije nismo dimenzionirali po hidrološki metodi HEC-1, saj v postopku lahko obravnavamo samo prispevne površine, večje od 259 m². V izračunu se namreč prispevne površine obravnavajo v kvadratnih miljah z natančnostjo štirih decimalnih mest. To ustreza površini 0,0001 mi², kar je 0,0259 ha. V primeru manjših površin bi program javil napako. Podobno je pri metodi SCS TR-20, kjer je minimalna površina 25,9 m². V izračunu program prispevne površine obravnava v kvadratnih miljah z natančnostjo petih decimalnih mest. Kanalizacijskega sistema nismo preverili po UK-modificirani metodi, saj je postopek omejen na geografsko področje Velike Britanije [Autodesk Inc., 2023].

Kanalizacijski sistem smo najprej dimenzionirali po racionalni metodi s kinematičnim valom. Pri tem smo za izračun časa koncentracije primerjali več metod: Carter, Kirpich, Papadakis-Kazan, FAA, Harris County in SWMM. Glede na prej opisane metode časa koncentracije in rezultatov, ki so predstavljeni v poglavju 4, se je izkazalo, da je metoda po Carterju najprimernejša, saj je najhitrejša glede vnašanja podatkov, vendar kljub

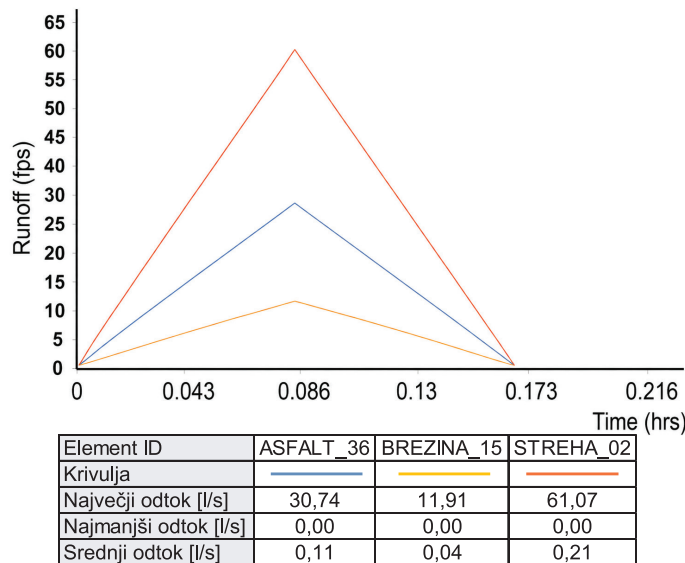
temu zajame pomembna vhodna podatka: dolžino površinskega toka in povprečni naklon površine. Določili smo minimalno vrednost časa koncentracije, ki znaša pet minut.

Kanalizacijski sistem smo dimenzionirali za vsako metodo posebej. Pri tem smo prilagajali premere cevi glede na pretok in polnitev, ki ne presega 70 % (± 3 %).

3 REZULTATI

Rezultati se lahko predstavijo v obliki datoteke formata .xlsx, ki jo izvozimo iz SSA. V programu lahko prikažemo tudi hidrograme in vzdolžne prereze kanalizacijskih vej z animacijo polnitve kanalizacijskega sistema. Hidrogrami iztoka iz sistema, hidrogrami posameznih prispevnih površin in hidrogrami posameznih odsekov se glede na izbrano metodo dimenzioniranja zelo razlikujejo. Pri tem imajo na videz enako obliko za sistem, prispevne površine in cevi. Zato so v nadaljevanju prikazani hidrogrami odtoka za izbrane tri prispevne površine glede na posamezno hidrološko metodo.

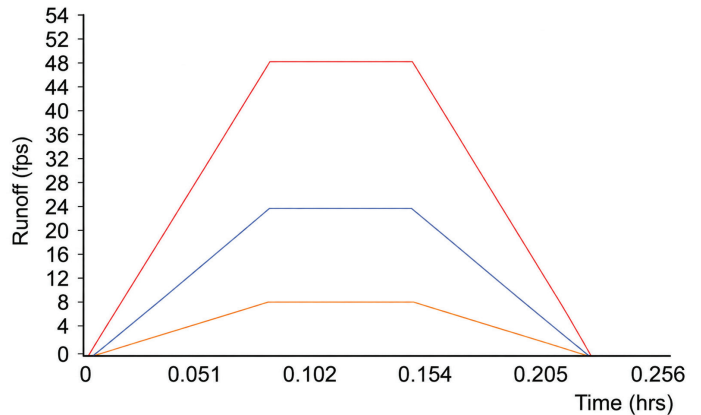
Slika 4 prikazuje hidrogram odtoka v primeru racionalne metode, ki je v obliki trikotnika. Čas trajanja naliva je pet minut in jakost naliva 156 mm/h. Največji odtok za vsako prispevno površino je zapisan pod hidrogramom in predstavlja vrh trikotnika, ki ga izračunamo po racionalni metodi.



Slika 4. Hidrogrami odtoka s treh prispevnih površin po racionalni metodi (Carter)

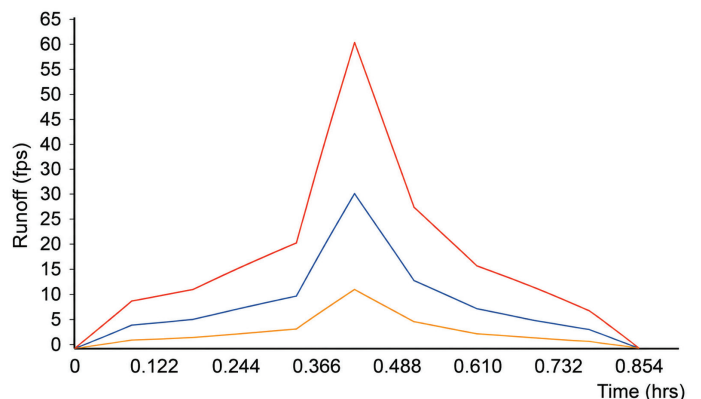
Slika 5 prikazuje hidrogram odtoka s prispevnih površin za primer modificirane racionalne metode. Čas trajanja naliva je osem minut in jakost naliva 126,11 mm/h. Največji odtoki so zapisani pod hidrogramom. Oblika hidrogramov je trapezna, saj je izbran čas trajanja naliva daljši od časa koncentracije.

Naslednja je racionalna metoda DeKalb (Slika 6). Čas trajanja naliva je pet minut in jakost naliva 156 mm/h. Največji odtoki so zapisani pod hidrogramom. Za to metodo je tipična zlomljena trikotna oblika hidrogramov.



Element ID	ASFALT_36	BREZINA_15	STREHA_02
Krivulja			
Največji odtok [l/s]	24,85	9,63	49,37
Najmanjši odtok [l/s]	0,00	0,00	0,00
Srednji odtok [l/s]	3,32	1,29	6,60

Slika 5. Hidrogrami odtoka s treh prispevnih površin po modificirani racionalni metodi

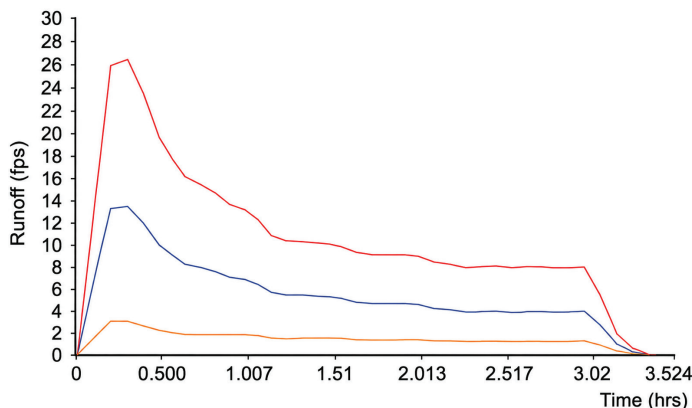


Element ID	ASFALT_36	BREZINA_15	STREHA_02
Krivulja			
Največji odtok [l/s]	30,74	11,91	61,07
Najmanjši odtok [l/s]	0,00	0,00	0,00
Srednji odtok [l/s]	0,32	0,12	0,63

Slika 6. Hidrogrami odtoka s treh prispevnih površin po racionalni metodi DeKalb

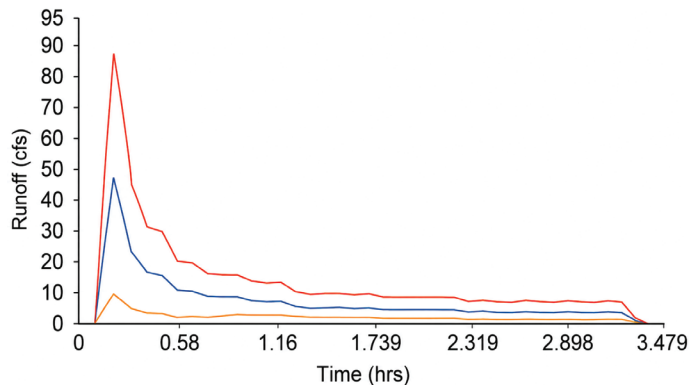
Hidrogrami odtoka po metodi Santa Barbara UH imajo že drugačno obliko (Slika 7), z izrazitim vrhom na začetku padavin. V program SSA smo za vhodni podatek o nalivu oz. o nevihti vnesli podatke o padavinah (kumulativne vrednosti) po času za obdobje treh ur. Te vrednosti prikazuje Preglednica 2.

Podobne hidrograme dobimo po metodi SCS TR-55 (Slika 8). V program SSA smo za vhodni podatek o nalivu oz. o nevihti vnesli podatke o padavinah (kumulativne vrednosti) po času za obdobje treh ur. Te vrednosti prikazuje Preglednica 2. Odtok z brežine po tej metodi je opazno manjši, vendar so odtoki z utrjenih in strešnih površin večji.



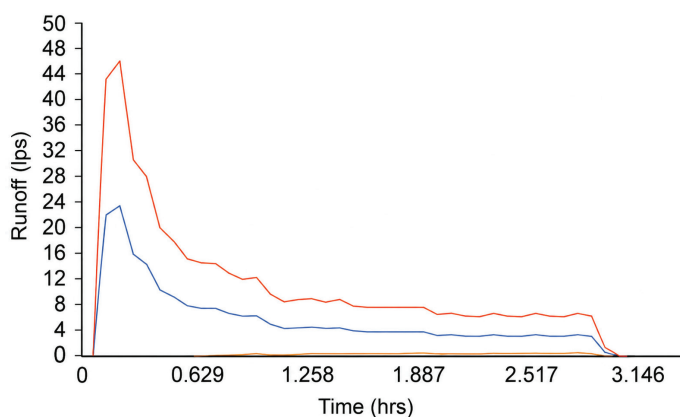
Element ID	ASFALT_36	BREZINA_15	STREHA_02
Krivulja			
Največji odtok [l/s]	13,21	2,35	26,24
Najmanjši odtok [l/s]	0,00	0,00	0,00
Srednji odtok [l/s]	2,49	0,62	4,94

Slika 7. Hidrogrami odtoka s treh prispevnih površin po metodi Santa Barbara UH



Element ID	ASFALT_36	BREZINA_15	STREHA_02
Krivulja			
Največji odtok [l/s]	43,78	8,01	87,92
Najmanjši odtok [l/s]	0,00	0,00	0,00
Srednji odtok [l/s]	0,80	0,25	1,60

Slika 9. Hidrogrami odtoka treh prispevnih površin po metodi oz. modelu SWMM



Element ID	ASFALT_36	BREZINA_15	STREHA_02
Krivulja			
Največji odtok [l/s]	22,44	0,59	44,89
Najmanjši odtok [l/s]	0,00	0,00	0,00
Srednji odtok [l/s]	0,73	0,04	1,45

Slika 8. Hidrogrami odtoka treh prispevnih površin po metodi SCS TR-55

Slika 9 prikazuje hidrograme odtoka po modelu SWMM. V program SSA smo za vhodni podatek o nalivu oz. o nevihti vnesli podatke o padavinah (kumulativne vrednosti) po času za obdobje treh ur. Te vrednosti prikazuje Preglednica 2. Opazimo lahko en sam vrh na začetku naliva za vsako prispevno površino, ki ponazarja največji oz. konični pretok.

Izvedla se je primerjalna analiza pretokov, hitrosti, dimenzioniranih premerov cevi in polnitve cevi glede na izbrane hidrološke metode. Obravnavanih je bilo 159 odsekov oz. cevi meteorne kanalizacije. Za prikaz razlik in primerjavo so v nadaljevanju prikazani samo tipični odseki, ki so navedeni tudi v Preglednici 3.

IZBRANE CEVI OZ. ODSEKI				
Naziv odseka	Dolžina [m]	Naklon [%]	Manningov koeficient hrapavosti	Tipični odsek
s.7	1,31	0,50	0,012	sekundarna cev iz rešetke v kanaleti
s.14	4,16	0,50	0,012	sekundarna cev iz točkovnega požiralnika ob cesti
s.16	23,52	1,00	0,012	sekundarna cev iz linijskega požiralnika na ploščadi
s.67	4,77	0,50	0,012	sekundarna cev iz peskolova strehe
p.28	20,00	0,50	0,012	primarna cev meteorne kanalizacije manipulativnih površin
p.64	6,10	1,00	0,012	primarna cev meteorne kanalizacije strešnih površin

Preglednica 3. Podatki o izbranih ceveh oz. odsekih meteornega sistema

V Preglednici 4 lahko primerjamo dobljene konične pretoke, ki so obarvani glede na količino od rumene do rdeče (rdeča pomeni večji in rumena manjši pretok). Preglednica 5 prikazuje dobljene največje hitrosti v izbranih odsekih. Določeni nazivni premeri teh cevi so prikazani v Preglednici 6 in njihove polnitve oz. izpolnjenost cevi v Preglednici 7. Premeri so prav

tako barvno prikazani od zelene do vijolične (zelena pomeni manjši, vijolična pa večji premer). Premeri cevi so določeni glede na pretok in polnitev cevi ($\leq 70\%$). Podatkov, ki so predstavljeni v Preglednici 3, pri nobenem dimenzioniranju nismo spreminjali.

PRETOKI [l/s]						
Naziv odseka	Racionalna metoda	Modificirana racionalna metoda	Racionalna metoda DeKalb	Santa Barbara UH	SCS TR-55	SWMM
s.7	5,54	4,49	5,55	1,56	1,68	5,19
s.14	7,04	5,74	7,06	2,83	5,05	9,41
s.16	13,53	11,28	13,68	5,96	10,04	19,89
s.67	40,15	39,70	39,87	25,94	38,11	38,35
p.28	50,47	43,27	51,73	22,38	37,84	72,48
p.64	240,17	261,58	241,02	168,72	243,15	243,78

Preglednica 4. Prikaz rezultatov dimenzioniranja – pretoki

HITROSTI [m/s]						
Naziv odseka	Racionalna metoda	Modificirana racionalna metoda	Racionalna metoda DeKalb	Santa Barbara UH	SCS TR-55	SWMM
s.7	0,65	0,62	0,65	0,46	0,46	0,64
s.14	0,77	0,73	0,69	0,54	0,63	0,74
s.16	1,56	1,50	1,07	0,84	0,98	1,18
s.67	1,11	1,10	1,10	0,95	1,05	1,05
p.28	1,30	1,25	1,30	1,04	1,18	1,40
p.64	2,17	2,21	2,17	1,97	2,17	2,17

Preglednica 5. Prikaz rezultatov dimenzioniranja – največje hitrosti

PREMERI CEVI [mm]						
Naziv odseka	Racionalna metoda	Modificirana racionalna metoda	Racionalna metoda DeKalb	Santa Barbara UH	SCS TR-55	SWMM
s.7	160	160	160	160	160	160
s.14	160	160	160	160	160	160
s.16	200	200	200	200	200	200
s.67	300	300	300	300	300	300
p.28	300	300	300	250	300	400
p.64	500	500	500	400	500	500

Preglednica 6. Prikaz rezultatov dimenzioniranja – določeni nazivni premeri cevi

POLNITEV CEVI [%]

Naziv odseka	Racionalna metoda	Modificirana racionalna metoda	Racionalna metoda DeKalb	Santa Barbara UH	SCS TR-55	SWMM
s.7	44%	39%	44%	23%	24%	42%
s.14	50%	45%	51%	31%	42%	61%
s.16	43%	39%	43%	28%	36%	53%
s.67	52%	52%	52%	41%	51%	51%
p.28	60%	55%	62%	49%	51%	47%
p.64	55%	58%	55%	64%	55%	56%

Preglednica 7. Prikaz rezultatov dimenzioniranja – polnitve cevi

4 ANALIZA IN INTERPRETACIJA REZULTATOV

Metode izračuna časov koncentracij Carter, Kirpich in Papadakis-Kazan so podale enake rezultate, saj so za vsako površino določile čas koncentracije pet minut, ki je bila določena kot najmanjša vrednost. Po metodi FAA za večino površin v izračunanem času koncentracije ni bilo razlik, le pri nekaterih površinah je prišlo do razlik od ene do pet minut. Metoda Harris County je vse čase koncentracije izračunala med 19 in 24 minutami. Po metodi oz. modelu SWMM, ki upošteva največ dejavnikov, je bil izračunan največji razpon časov. Za asfaltne in strešne površine so časi koncentracije zelo kratki (< 4 min), za brežine pa relativno daljši (od 5 do 16 minut), saj sta upoštevana infiltracija in zadrževanje padavin glede na tip in velikost površine.

Razmerje koničnih odtokov s površin je obratno sorazmerno s časom koncentracije. Daljši ko je čas koncentracije, manjši je maksimalni odtok, in krajši ko je čas koncentracije, večji je maksimalni odtok vode s površine. Največji konični pretoki so bili izračunani po metodi SWMM in racionalni metodi DeKalb, najmanjši pa po metodi Santa Barbara UH.

Iz primerjave izračunanih največjih hitrosti ni mogoče razbrati kakšnih posebnih ugotovitev ali lastnosti. Potrebna je bila samo preveritev, da hitrosti vode v cevi ne presegajo najvišje dovoljene hitrosti 3 m/s.

Preglednica 6 barvno podaja premere cevi, ki so bili določeni glede na izračunane vrednosti pretoka in izpolnjenosti cevi. Opaziti je mogoče, da metodi SWMM in racionalna metoda DeKalb zahtevata večje premere na nekaterih končnih odsekih vej meteorne kanalizacije, kar je posledica večjih pretokov. Pri sekundarnih ceveh in začetnih odsekih je najmanjši določen premer cevi DN 160 mm. Pri različnih metodah ni opaziti razlik pri velikostih premerov začetnih odsekov oz. sekundarnih cevi. Vse metode je mogoče in priporočljivo uporabiti na manjših območjih. Zato v končnih dimenzijah cevi v primeru manjših projektov, kjer ni večjih prispevnih površin in dolgih vej meteorne kanalizacije, ni razlik. Če dobimo enake premere cevi po različnih metodah, lahko opazujemo, kakšne so polnitve cevi. Vrednosti polnitve cevi so po racionalni, modificirani racionalni in racionalni metodi DeKalb ter metodi SWMM relativno podobne. Dosti manjše so po metodi Santa Barbara UH in SCS TR-55.

5 SKLEP

Pri projektiranju logističnega centra je bila želja in potreba investitorja po čim večjem izkoristku gradbene parcele za izgradnjo objekta in zunanjih manipulativnih površin. S tem se je z zmanjšanjem zelenih površin zmanjšal zadrževalni učinek površinskega odtoka padavin, kar dodatno obremenjuje kanalizacijski sistem za odvodnjo padavinskih voda. Posledično so za strešne in manipulativne površine krajši časi koncentracije, večji odtočni volumni površinskega toka, večji pretoki v ceveh in večji premeri cevi. Zelene površine, v tem primeru brežine, zadržujejo vodo na površini, nekaj vode tudi ponikne, preostali površinski tok čiste vode pa odteče do požiralnika v kanalizacijski sistem.

Pri projektiranju meteorne kanalizacije se uporabljajo različne metode za določanje hidravličnih obremenitev. V praksi se pogosto uporablja programska oprema, kot je Autodesk Storm and Sanitary Analysis (SSA), ki omogoča simulacije po več metodah.

Izvedena je bila primerjalna analiza različnih metod dimenzioniranja meteorne kanalizacije na konkretnem primeru iz prakse z uporabo programa SSA. Za podobne projekte so glede na dobljene rezultate najuporabnejše hidrološka metoda racionalna metoda, metoda izračuna časa koncentracije po Carterju in hidravlična metoda kinematičnega vala. Racionalna metoda je enostavna in hitro pridemo do rezultatov. Če želimo natančnejše rezultate in hidrograme nalivov, uporabimo metodo SCS TR-55, ki je prav tako uporabna za hitre analize.

Metoda SWMM je najbolj natančna, vendar zahteva veliko vhodnih podatkov, kar naredi delo zamudno. Prav tako z njo dobimo večje pretoke. Najmanjše pretoke in premere cevi smo dobili po metodi Santa Barbara UH, ki je pravzaprav zasnovana za določeno okrožje v ZDA in zato ni primerna za uporabo v Sloveniji. Podobno velja za racionalno metodo DeKalb. Modificirana racionalna metoda zahteva uporabniško izbran čas trajanja naliva, ki se ga določi izkustveno, kar vpliva na rezultate izračuna.

V Preglednici 8 so predstavljene in zbrane informacije o zahtevnosti in primernosti metod ter prednosti in slabosti primerjanih hidroloških metod, ki so bile razbrane iz rezultatov in analize teh podatkov.

Hidrološka metoda	Zahtevnost	Primernost	Prednosti	Slabosti
Racionalna metoda	zelo nizka	manjša območja	Preprosta, hitra analiza, osnovni parametri: koeficient odtoka, jakost naliva, velikost površine, dovolj natančna za manjša območja	Ne dobimo hidrogramov nalivov, samo največji pretok, ni primerna za večja območja, ne upošteva zadrževalnikov, časovne porazdelitve padavin, dinamike odtoka
Modificirana racionalna metoda	nizka	manjša območja, enostavni projekti	Preprosta, hitra analiza, omogoča generiranje časovno odvisnega hidrograma, omogoča dimenzioniranje zadrževalnikov in akumulacij	Uporabniško določen čas trajanja naliva, enake poenostavitve kot pri racionalni metodi
Racionalna metoda DeKalb	nizka srednja	urbana območja	Generiranje hidrograma iz največjega pretoka	Zasnovana za določeno območje v ZDA (DeKalb), ni primerno za slovensko področje, ni primerna za večja območja
Santa Barbara UH	srednja	urbana območja	Relativno enostavna, generiranje hidrograma	Zasnovana za določeno območje v ZDA (Santa Barbara), ni primerna za območje Slovenije
SCS TR-55	srednja	manjša območja	Enostavna, razširjena, možnosti določanja oblike površinskega toka	Zasnovana za območja v ZDA, možnost prilagoditve za območje Slovenije, za manjša območja
EPA SWMM	visoka	kompleksni urbani in naravni sistemi, kakovost vode	Najbolj natančna, upošteva veliko realnih dejavnikov, dinamična simulacija celotnega sistema, kakovost vode	Zahtevnejša, kompleksnejša, zamudna, zahteva veliko vhodnih podatkov

Preglednica 8. Primerjava izbranih hidroloških metod za dimenzioniranje meteorne kanalizacije

6 ZAHVALA

Zahvalila bi se mentorici moje magistrske naloge Janji Kramer Stajnko in delovni somentorici Živi Hanžič. Zahvala gre tudi podjetju Štajerski Inženiring, d. o. o., ki mi je omogočilo uporabo projekta za namen analize v magistrski nalogi in predstavitve v članku.

7 LITERATURA

Autodesk Inc., Autodesk © Storm and Sanitary Analysis 2024 User's Guide, 2023.

Autodesk Inc., InfoDrainage Help Documentation, 2025.

CivilGEO Inc., Stormwater Hydrology Methods, dostopno 18. 4. 2026, <https://knowledge.civilgeo.com/stormwater-hydrology-methods/>, 2026.

CROSSRISK, Povratne dobe za ekstremne padavine, dostopno 12. 5. 2026, <https://crossrisk.eu/sl/climate?param=precipitation>, 2026.

Harris County Engineering Department, Regulations of Harris County, Texas for the Approval and Acceptance of Infrastructure (Vol. 18). HARRIS COUNTY, 2018.

Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual CPD-1A, 1998.

Kolar, J., Odvod odpadne vode iz naselij in zaščita vode: tehnika zbiranja, odvoda, čiščenja in dispozicije odpadne ter padavinske vode. Ljubljana: Državna založba Slovenije, 1983.

Kompare, B., Modeliranje deževnega odtoka iz urbaniziranih povodij. Ljubljana: Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, VTOZD Gradbeništvo in geodezija, Inštitut za zdravstveno hidrotehniko, 1991.

Munda, E., Kramer Stajnko, J., Hanžič, Ž., Analiza različnih metod dimenzioniranja meteorne kanalizacije na praktičnem primeru, Magistrsko delo. Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo, Maribor, <https://dk.um.si/Dokument.php?id=200756&lang=slv>, 2025.

Salimi, E. T., Nohegar, A., Malekian, A., Hoseini, M., Holisaz, A., Estimating time of concentration in large watersheds, Paddy and Water Environment, 15, 123-132, <https://doi.org/10.1007/s10333-016-0534-2>, 2016.

Sultan, D., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Adgo, E., Tsegaye Meshesha, D., Almaw Fenta, A., ... Asamin Setargie, T., (February 9), Evaluation of lag time and time of concentration estimation methods in small tropical watersheds in Ethiopia, Journal of Hydrology: Regional Studies, 40, 101025, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101025>, 2022.

FOTOREPORTAŽA MORAVSKI KORIDOR E-761 POJATE– PRELJINA (SRBIJA) & KORIDOR 8 IN 10D TETOVO–BUKOJČANI, PRILEP– BITOLA (SEVERNA MAKEDONIJA)



Slika 1. Ekipo projektantov HPS, d. o. o., GRADIS, BP MARIBOR, d. o. o., in DB INŽENJERING, d. o. o.

Lokacija: Srbija in Severna Makedonija

Investitor: država Srbija oz. Severna Makedonija

Projektant ceste: HPS, d. o. o. (Beograd, Srbija)

Projektant gradbenih konstrukcij: GRADIS, BP MARIBOR, d. o. o., in DB INŽENJERING, d. o. o. (Beograd, Srbija)

Izvajalec: Bechtel-ENKA Joint Venture

Projekt Moravski koridor E-761 Pojate–Preljina v Srbiji ter projekta Koridor 8 in 10D v Severni Makedoniji predstavljajo pomembne infrastrukturne naložbe za boljšo prometno povezanost Balkana. Moravski koridor obsega približno 112 km avtoceste od Pojat do Preljine in povezuje osrednjo Srbijo z glavnimi prometnimi smermi. V Severni Makedoniji projekt Koridor 8 in 10D zajema gradnjo avtocestnih odsekov Tetovo–Gostivar, Gostivar–Bukojčani, Trebeništa–Struga–Kjafasan ter odsek Prilep–Bitola, v skupni dolžini približno 111 km. Koridor 8 je pomembna vzhodno–zahodna povezava med Jadranskim in Črnim morjem. Koridor 10D pa dopolnjuje panevropsko prometno omrežje proti Grčiji. Izvajalec obeh projektov je Bechtel-ENKA Joint Venture, ki s temi deli prispeva k hitrejšemu, varnejšemu in učinkovitejšemu prometu, boljšim logističnim povezavam ter gospodarskemu razvoju regije.

Moravski koridor E-761

Dolžina trase: 112 km

Število objektov: 52 (33 mostov, 10 nadvoзов, 8 podvoзов in 1 nadhod)

Čas gradnje: 2020–2026



Slika 2. Izdelava zaključne asfaltne plasti na Moravskem koridorju (na dan izvedejo približno 3 km trase)



Slika 3. Gradnja nadvoza (za gradnjo nadvoza potrebujejo približno dva meseca)

Slika 4. Priprava površine za izvedbo hidroizolacije



Slika 5. Zaključna dela na trasi



Slika 6. Končan nadvoz

Koridor 8 in 10D

Dolžina trase: 111 km

Število objektov: 74 (29 mostov, 31 nadvozo in 14 podvozo)

Čas gradnje: 2024–2028 (predvideno, soočajo se z ogromnimi težavami pri odkupu zemljišč)



Slika 7. Nastanitveni gradbiščni kompleks za zaposlene v Severni Makedoniji. Tako v Srbiji kot v Severni Makedoniji sta vzpostavljena dva takšna kompleksa za zaposlene



Slika 8. Prefabrikacijski obrat za izdelavo betonskih elementov (v Srbiji so bili v času največje ekspanzije del vzpostavljeni trije takšni obrati, v Severni Makedoniji sta trenutno dva)



Slika 9. Deponija materiala, v ozadju prefabrikacijski obrat in deponija izvedenih prefabrikatov



Slika 10. Armatura nosilca za most B0080



Slika 11. BVO, izdelane v prefabrickijskem obratu



Slika 12. Montaža prefabriciranih prednapetih nosilcev na mostu Vardar B0051



Slika 13. Gradnja mostu B00070



Slika 14. Gradnja mostu B00080. V ozadju gradnja izkopa v km 7+500. Predvidena količina izkopanega materiala, ki ga bodo uporabili za izvedbo nasipov avtocestnega telesa ter kot agregat za proizvodnjo betonov, je več kot 5 milijonov m³

Avtorja fotoreportaže: Gregor Cipot, univ. dipl. inž. grad. (GRADIS, BP MARIBOR, d. o. o.)
Marko Živec, univ. dipl. inž. grad. (GRADIS, BP MARIBOR, d. o. o.)

FOTOREPORTAŽA TEHNOLOŠKI INKUBATOR TechHUB i4.0



Slika 1. BIM-model načrtovanega objekta TechHUB Velenje

Lokacija: Velenje

Investitor: Mestna občina Velenje in Kemijski inštitut

Izvajalec: VG5, d. o. o.

Tehnološki park Velenje – TechHUB i4.0 je zasnovan kot sodoben razvojno-inovacijski center, namenjen spodbujanju podjetništva, razvoja naprednih tehnologij ter povezovanja med gospodarstvom in raziskovalnim okoljem. Objekt je umeščen v poslovno cono Stara vas na severozahodnem delu Velenja.

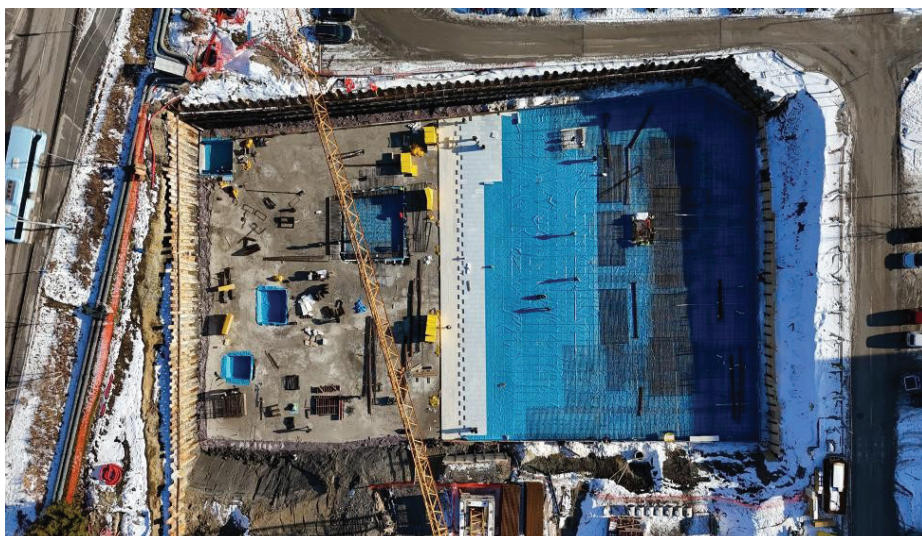
Zasnovan je kot večetažni objekt (klet, pritličje, medetaža in nadstropje) s skupno bruto površino približno 7.200 m² (5.800 m² za Mestno občino Velenje in 1.400 m² za Kemijski inštitut). Ocenjena vrednost gradbenih del je 15,4 milijona EUR, od tega je 92 % sofinanciral Sklad za pravičen prehod EU (kohezijska politika 2021–2027). Predviden konec gradnje je v sredini leta 2027.



Slika 2. Območje pred začetkom gradnje v Velenju



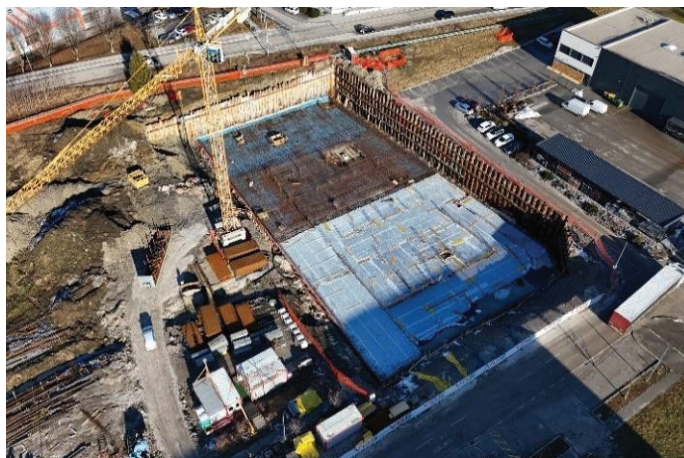
Slika 3. Izvedba zemeljskih del



Slika 4. Izvedba armiranobetonske temeljne plošče objekta



Slika 5. Postavljanje armature v kletni etaži objekta



Slika 6. Priprava armature pred betoniranjem



Slika 7. Betoniranje in obdelava kletne etaže



Slika 8. Začetek izvedbe prve etažne plošče

Potek gradnje objekta je na slikah predstavljen skozi zaporedje ključnih faz, ki jasno prikazujejo napredovanje del na gradbišču. Uvodoma je prikazano območje pred začetkom gradnje, kjer sta razvidna izhodiščno stanje in priprava lokacije za izvedbo. Sledi faza zemeljskih del, v kateri potekata izkop gradbene jame in urejanje terena. Ker teren položno pada (višinska razlika je ca. 4 m), je bilo pred izkopom nujno izvesti varovanje gradbene jame v kombinaciji zagatnic (sever in vzhod objekta) in širokega izkopa (južni in zahodni del) po celotnem obodu objekta. Zagatnice na severnem delu objekta so hkrati služile kot enostranski opaž obodne stene kletne etaže. Ves čas gradnje je predvideno aktivno črpanje podtalne vode. Mehanske karakteristike tal: projektna odpornost tal 446,7 kN/m², modul reakcije tal 10 MN/m³, tip tal C.

V nadaljevanju je prikazana izvedba temeljne konstrukcije, armiranobetonska plošča debeline 70 cm nalega na tamponski podlagi globine ca. 1 m, na kateri je bila zahtevana zbitost vsaj 40 MPa. Zaradi zahtev po vodotesnosti so bile temeljna plošča in zunanje obodne stene izvedene z vodoneprepustnim sistemom XYPEX. Pri vgradnji je bila posebna pozornost namenjena protiprebojni armaturi po sistemu Schöck BOLE, ki je predpisana na mestih stebrov v temeljni plošči. Beton je kvalitete C30/37.

Betoniranje temeljne plošče označuje pomemben mejnik v gradnji, saj konstrukcija pridobi svojo osnovno trdnost in obliko. V zaključnih fazah je prikazano nadaljevanje gradnje z izvedbo prve etažne plošče ter postopnim razvojem konstrukcije.

Objekt leži na potresnem območju s projektnim pospeškom tal 0,125 g. Konstrukcija je bila preverjena z multimodalno spektralno analizo v skladu z EC8. Nosilna konstrukcija je zasnovana kot skeletna AB konstrukcija s stebri 60/60 cm, ki so pomaknjeni na ovoj stavbe in s tem zagotavljajo maksimalno prosto notranjost za fleksibilno rabo. Plošče so armiranobetonske debeline 30–35 cm, medtem ko je plošča nad pritličjem izvedena kot sovprezna plošča s HI-BOND-pločevino na jeklenih nosilcih – rešitev, ki zmanjša lastno težo in pohitri gradnjo.

Del objekta, ki ga bo zasedel Kemijski inštitut (kletna etaža in medetaža severnega trakta), vključuje procesno halo, šaržni reaktor, strojnico reverzne osmoze, hladno sobo, sušilnico biomase ter ločeno skladišče kemikalij s tovornim dvigalom in zbirni rezervoar odpadnih tekočin. Takšen tehnološki program postavlja posebne zahteve pri načrtovanju konstrukcije – od kemijske odpornosti površin do zagotavljanja toge konstrukcijske podlage za procesno opremo. Pregrade med laboratorijskimi prostori so lahke montažne konstrukcije za lažje prilagajanje tehnološkim potrebam v prihodnosti. Za preprečevanje tresljajev na lokaciji, kjer bo postavljena merilna oprema, bo izvedena dilatirana mikroarmirana plošča. Dilatacija bo izvedena s pluto visoke gostote ali ekvivalentnim materialom.



Slika 9. Trenutno stanje gradnje objekta TechHUB

Arhitekturno prepoznavnost objekta zagotavlja zunanja steklena fasadna opna z integriranimi transparentnimi fotovoltaičnimi (FV) moduli, pritrjenimi na IPE-jeklene profile, toplotni mostovi so preprečeni z elementi Schöck Isokorb. Poleg fasadnih modulov bo na ravni strehi urejena sončna elektrarna. Centralni atrij v prvem nadstropju pokriva jeklena nadstrešnica s stekleno kritino in integriranimi FV-moduli, ki zagotavlja naravno osvetlitev skupnih prostorov in hkrati prispeva k lastni oskrbi objekta z električno energijo.

Objekt predstavlja sodoben gradbeni projekt, ki združuje funkcionalnost, tehnološko naprednost in trajnostni pristop. Omogoča učinkovito izvajanje razvojnih in inovacijskih dejavnosti in ustvarja kakovostno delovno okolje. Hkrati prispeva h gospodarskemu razvoju in širšemu družbenemu napredku.

Avtorja fotoreportaže: Luka Medvešek, dipl. inž. grad., VG5, d. o. o.
Nora Pavičević, dipl. ekon., VG5, d. o. o.

FOTOREPORTAŽA VEČSTANOVANJSKI OBJEKT SONČNE LIVADE KRANJ



Slika 1. Večstanovanjski objekt Sončne livade Kranj

Lokacija: Cesta Rudija Šeliga, Kranj

Investitor: BRILOSA, d. o. o.

Izvajalec: Dilca, d. o. o.

Ob Cesti Rudija Šeliga v Kranju, v soseski Planina, poteka gradnja novega večstanovanjskega objekta Sončne livade Kranj. Projekt investitorja BRILOSA, d. o. o., v izvedbi podjetja Dilca, d. o. o., predstavlja premišljeno zapolnitev vrzeli v obstoječi stanovanjski zazidavi, ki se razprostira vzdolž glavne prometnice. V urbanem okolju, kjer se srečata visoka blokovska zazidava na jugu in nizka zazidava enodružinskih hiš na severu, novogradnja z dvema štirietažnima lamelama (K + P + 2N + M) in skupno podzemno garažo vzpostavlja usklajen prehod med različnimi merili grajene strukture.

V objektu bo 28 stanovanj, razporejenih v dve lameli (A in B). Skupna bruto tlorisna površina znaša 5.295,94 m², neto tlorisna površina pa 4.519,46 m². Zasnova vključuje skupno kletno garažo z 48 parkirnimi mesti, med njimi so štiri za gibalno ovirane osebe, ter enajst nadzemnih parkirnih mest. Tri stanovanja so načrtovana kot dostopna gibalno oviranim osebam, s čimer objekt presega minimalne zahteve dostopnosti.

Arhitekturno je objekt zasnovan kot lamelni blok s podolgovatim tlorisnim gabaritom posamezne lamele v razmerju stranic 1:2,2 in dimenzijami 28,9 × 13,0 m. Ravne strehe so usklajene s sosednjimi objekti v obličnem nizu. Fasada je izvedena kot kontaktni fasadni sistem z izolacijskimi ploščami iz ekspaniranega polistirena debeline 20 cm, na posameznih delih dopolnjena z dekorativnimi oblogami iz perforirane pločevine. Barva fasade bo bela, klasično ometana, kombinirana s fasadnimi poudarki peščene barve.



Slika 2. Začetna faza gradnje z izkopi, pripravo terena in podložnim betonom



Slika 3. Priprava temeljne plošče

Najnižji del objekta je kletna garaža, do katere z vozili dostopamo preko uvozno-izvozne klančine. Kletna etaža je zasnovana kot skupna garaža v enem nivoju pod obema lamelama, kar je rezultat analize, ki je pokazala, da je takšna rešitev najugodnejša z vidika geomehanike, vpliva na okoliške objekte, podzemne vode, statike in racionalne izrabe prostora. Armiranobetonska temeljna vodoodporna plošča je debeline 40 cm, obodne kletne stene iz vodoodpornega betona pa debeline 25 cm. Debelina plošče nad kletjo in pod terenom je 30 cm.

V kleti so poleg 48 parkirnih mest umeščene shrambe za posamezna stanovanja, tehnični prostori, kolesarnice in prostori za čistila. Povezava z nadzemnima lamelama je zagotovljena preko dveh stopniščnih jeder z dvigali, kar omogoča nemoten vertikalni dostop tudi gibalno oviranim osebam.

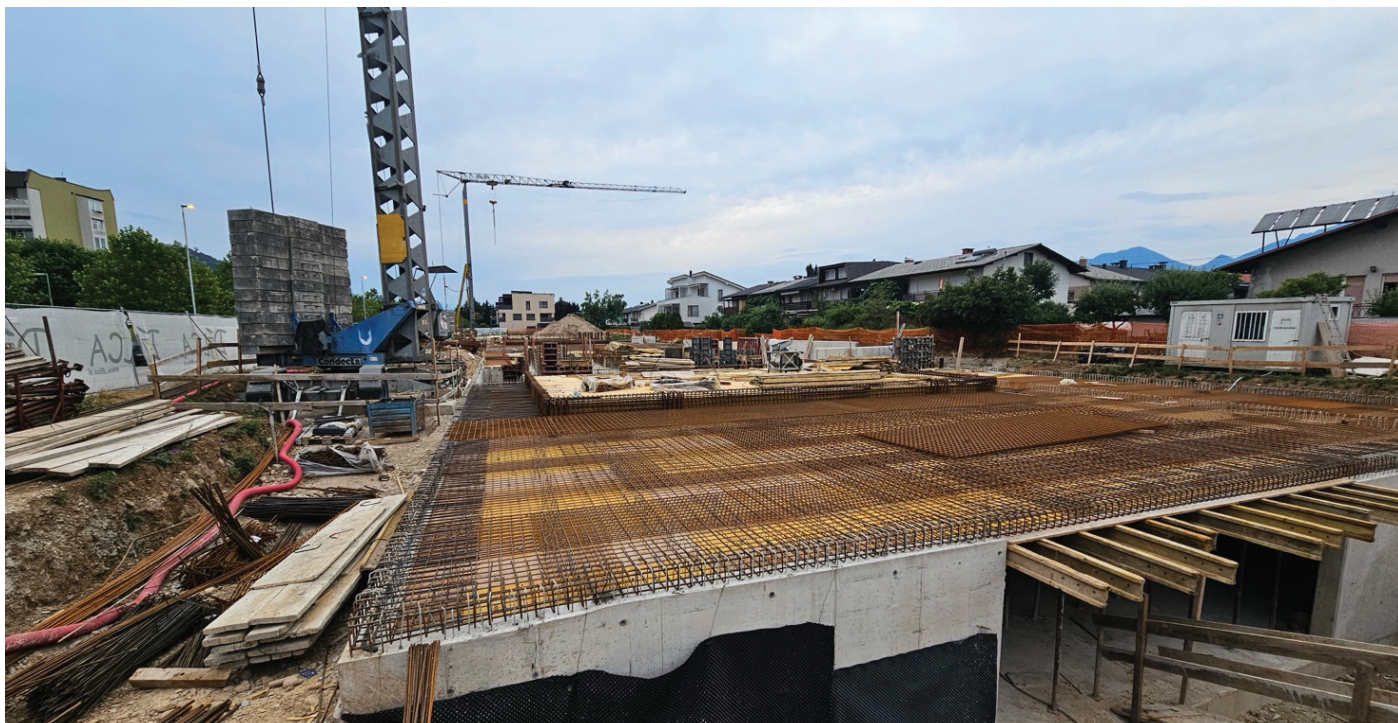


Slika 4. Betoniranje temeljne plošče



Slika 5. Izvedba kletne etaže

Nosilna konstrukcija celotnega objekta je v celoti armiranobetonska. Zunanji in notranji nosilni zidovi nad pritličjem so debeline 20 cm, debelina medetažnih plošč v vseh nadstropjih pa je 22 cm. Vsaka lamela ima svoj vhod na cestni fasadi z vetrolovom širine 2,56 m in globine 2,84 m, opremljenim z nabiralniki in domofonom. Stanovanjski lameli sta obdani z zelenimi atriji, ki pripadajo stanovanjem v pritličju, kar prebivalcem pritličnih enot zagotavlja zasebnost in neposreden stik z zunanjim prostorom.



Slika 6. Izvedba plošče nad kletjo



Slika 7. Izvedba sten pritličja

Prvo in drugo nadstropje ohranjata enako konstrukcijsko zasnovano pritličja z armiranobetonskim skeletnim sistemom. V obeh nadstropjih so funkcionalno zasnovane bivalne enote s pripadajočimi sanitarnimi prostori. Zazidana površina posamezne lamele znaša 370,45 m². Mansardna (terasna) etaža je skladna z določili prostorskega akta – njena tlorisna površina ne presega 60 % površine etaže pod njo (221,65 m² od 370,45 m², razmerje 0,598). Debelina armiranobetonske plošče v terasni etaži variira od 18 do 30 cm, strešna plošča pa je debeline 20 cm.

Kvalitetna PVC/ALU-okna imajo izolacijsko troslojno zasteklitev in zunanje aluminijaste žaluzije na električni pogon. Balkonske ograje so izvedene iz vertikalnih in horizontalnih jeklenih profilov s paneli iz pocinkane, dvoslojne, perforirane pločevine. Ograje teras so iz varnostnega kaljenega stekla, vpetega v aluminijasti nosilni profil.



Slika 8. Pogled na lamelo B med gradnjo

Objekt je zasnovan v skladu s trenutno veljavno zakonodajo s področja učinkovite rabe energije v stavbah. Ogrevanje posameznih stanovanj je zagotovljeno s toplotnimi črpalkami, ki so nameščene individualno v vsakem stanovanju, zunanje enote pa so umeščene na strehi objekta. Prezračevanje se izvaja preko decentralnih prezračevalnih naprav z rekuperacijo toplote, kar zagotavlja kakovost notranjega zraka ob minimalni energetski porabi. Za hlajenje je predvidena predinštalacija za naknadne split sisteme. Kontaktni fasadni sistem z 20 cm toplotne izolacije, troslojna zasteklitev in ustrezna orientacija stavbe skupaj zagotavljajo nizke toplotne izgube in visoko stopnjo energetske učinkovitosti.



Slika 9. *Dokončana AB konstrukcija z vgrajenim stavbnim pohištvom*

Zunanja ureditev območja vključuje skupne zelene površine severno od obeh lamel, otroško igrišče na severovzhodni strani ter linijo dreves ob občinskem zemljišču. Na južni strani je med gradbeno parcelo in Cesto Rudija Šeliga urejen zeleni pas z mešano površino za kolesarje in pešce širine 3,0 m. Padavinske vode s streh se preko peskolovov odvajajo v ponikanje, padavinske vode s povoznih površin pa preko lovilcev olj v ponikovalnice na zemljišču investitorja. Objekt bo priključen na javno vodovodno, kanalizacijsko, elektro in telekomunikacijsko omrežje.



Slika 10. Večstanovanjski objekt Sončne livade Kranj

Kranj je s hitrim razvojem v preteklih letih postal tretje največje mesto v Sloveniji. Trajnostni urbanizem in umeščanje kvalitetne stanovanjske gradnje sta bistvenega pomena za uspešen razvoj mesta. Z večanjem števila mestnih prebivalcev rastejo potrebe po novih in sodobnih stanovanjih. Večstanovanjski objekt Sončne livade Kranj je zato kljub manjšemu številu stanovanj pomemben delček v mozaiku novih domov. S preišljeno tlorisno zasnovo, prijetno arhitekturno podobo, energetske učinkovitostjo in kvalitetno izvedbo bo prispeval k dvigu bivanjske kvalitete v največjem gorenjskem mestu.

Avtorja fotoreportaže: Jerneja Sklepič Erklavec, mag. inž. arh., BRILOSA, d. o. o.

Matej Hribernik, BRILOSA, d. o. o.

Foto: Matej Hribernik, Davor Stanivuković

ZADNJI PRIPRAVLJALNI SEMINAR IN IZPITNI ROK ZA STROKOVNE IZPITE ZA GRADBENO STROKO V LETU 2026

SEMINAR	IZPIT
12. - 14. 10. 2026	17. - 24.11.2026

A. PRIPRAVLJALNI SEMINARJI:

Seminarje organizira **Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana**:

Telefon: (01) 52-40-200; e-naslov: gradb.zveza@siol.net; gradbeni.vestnik@siol.net.

Uradne ure: od ponedeljka do četrтка od 09.00 do 14.00 ure; v petek ni uradnih ur za stranke.

Pripravljalni seminar bo za:

- 1. Pooblašcene inženirje gradbene stroke**
- 2. Vodje del za področje gradbene stroke**

Predavanja bodo iz naslednjih predmetov izpitnega programa:

- 1. Predpisi s področja graditve objektov, urejanja prostora, arhitekturne in inženirske dejavnosti, zborničnega sistema ter osnov varstva okolja in splošnega upravnega postopka**
- 2. Investicijski procesi in vodenje projektov**
- 3. Varstvo zdravja in življenja ljudi ter varstvo okolja pri graditvi objektov**
- 4. Področni predpisi in standardizacija s področja graditve objektov**

Predavatelji so člani izpitne komisije pri Inženirski zbornici Slovenije (IZS).

Cena za udeležbo na seminarju znaša **797,00 EUR z DDV**. Cena vključuje predavanja, seminarsko gradivo, odmor za kavo ter možnost brezplačnega parkiranja, ki je na voljo do zapolnitve razpoložljivih parkirnih mest.

Udeleženci se lahko udeležijo zgolj posameznega predavanja v okviru rednega programa seminarja. Cena udeležbe na posameznem predavanju znaša 160,00 EUR z DDV.

Seminarji praviloma potekajo v predavalnici; v primeru višje sile se izvedejo v obliki videokonference.

Vabilo na seminar z urnikom in vsemi ustreznimi navodili prejme vsak udeleženec teden dni pred začetkom predavanja.

Kotizacijo za seminar je potrebno nakazati ob prijavi na poslovni račun ZDGITS: **SI56 0201 7001 5398 955**.

Prijavo je potrebno posredovati organizatorju (ZDGITS) na e-naslov gradb.zveza@siol.net najmanj **7 delovnih dni pred začetkom** seminarja! Prijavni obrazec je objavljen na spletni strani ZDGITS (<http://www.zveza-dgits.si>).

Seminar se izvede pod pogojem, da je prijavljenih najmanj 20 udeležencev. V primeru, da minimalno število prijav ni doseženo, si organizator pridržuje pravico do odpovedi ali prestavitve termina seminarja oziroma do spremembe načina izvedbe seminarja iz izvedbe v živo v izvedbo prek videokonference, o čemer bodo udeleženci pravočasno obveščeni.

B. STROKOVNI IZPITI

potekajo pri **Inženirski zbornici Slovenije (IZS), Jarška 10-B, 1000 Ljubljana**.

Vse informacije o strokovnih izpitih in izpitnih programih je moč pridobiti:

- osebno na sedežu IZS
- po telefonu na številki (01) 547 33 19 oziroma na mobilni številki 069 910 182
- po elektronski pošti na naslovu martina.babnik@izs.si
- na spletni strani IZS (www.izs.si)

Uradne ure IZS:

- sedež IZS: ponedeljek, sredo, četrtek in petek od 8.00 do 12.00, torek od 12.00 do 16.00
- telefonske informacije: ponedeljek, sredo, četrtek in petek od 10.00 do 12.00, torek od 14.00 do 16.00

NOVI DIPLOMANTI GRADBENIŠTVA

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Ajda Zupančič. Konvencionalni pristopi in napredne tehnologije za preprečevanje rasti plesni na primeru enodružinske hiše, mentorica izr. prof. dr. Mateja Dovjak, somentorica doc. dr. Petra Štukovnik;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=180269>

Andraž Vene. Analiza vpliva sončnega sevanja in padavin na higrotermalni odziv strehe, mentor izr. prof. dr. Mitja Košir;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=180270>

Lovro Gliha. Analiza in optimizacija organizacijske oblike graditve na primeru zahtevnega projekta, mentor izr. prof. dr. Matevž Dolenc, somentor asist. dr. Aleksander Srdič;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=182041&lang=slv>

David Vrančič. Oddaja vloge za izdajo gradbenega dovoljenja v sistemu eGraditev, mentor doc. dr. Robert Klinc;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=182915>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO (smeri Gradbene konstrukcije, Geotehnika-hidrotehnika, Nizke gradnje)

Loris Strain. Potresna utrditev zidanega objekta z inovativnimi jeklenimi ojačitvenimi sistemi, mentor doc. dr. David Antolinc, somentor prof. dr. Vlatko Bosiljkov;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=181209>

Arnela Karović. Analiza sistema rednega vzdrževanja državnih cest s predlogi za optimizacijo, mentor doc. dr. Robert Klinc;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=181211>

Martin Jakovina. Prometno – tehnični vidik izvedljivosti novega avtocestnega priključka, mentor doc. dr. Rok Marsetič, somentor asist. Luka Trček;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=181210>

Kristina Stoilova. Določitev delnih varnostnih faktorjev za primer dimenzioniranja jeklene konstrukcije, mentor prof. dr. Goran Turk, somentorica doc. dr. Sara Zoubek;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=180709>

Miha Sušec. Odpornost večstanovanjske stavbe v Ljubljani na pregrevanje, mentor doc. dr. Luka Pajek;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=182044&lang=slv>

Urška Žonta. Operativno planiranje gradnje po principih vitke gradnje, mentor doc. dr. Robert Klinc, somentor asist. dr. Aleksander Srdič;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=182043&lang=slv>

Katarina Gerič Škopac. Vozna steza za hitri izhod in njen vpliv na zmogljivost letališča, mentor doc. dr. Robert Rijavec, somentorica doc. dr. Irena Strnad Trček;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=182765>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Jakob Blatnik. Uporaba modela HEC-RAS po metodi mrežnih padavin za določitev poplavne nevarnosti, mentor izr. prof. dr. Gašper Rak, somentorici doc. dr. Mateja Škerjanec in prof. dr. Mojca Šraj;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=181052>

Urban Vozelj. Uporaba hidrološkega modela za določanje projektnih hidrogramov, mentor izr. prof. dr. Nejc Bezak;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=182012&lang=slv>

Simone Morelli. Anaerobna sproizvodnja kot možnost za izboljšanje proizvodnje metana, mentorica doc. dr. Sabina Kolbl Repinc, somentor prof. dr. Alessio Siciliano;
<https://repozitorij.uni-lj.si/lzpisGradiva.php?id=181703&lang=slv>

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO, PROMETNO INŽENIRSTVO IN ARHITEKTURO

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Jure Zupanc. 3D skeniranje za potrebe monitoringa poškodb objektov, mentor doc. dr. Rok Kamnik;
<https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=97311>

Rubriko ureja **Eva Okorn**, gradb.zveza@siol.net

KOLEDAR PRIREDITEV

4.-5.6.2026

**International Conference on Contemporary
Theory and Practice in Construction XVII**

Banja Luka, Bosna in Hercegovina
<https://stepgrad.aggf.unibl.org>

15.-19.6.2026

7th fib Congress 2026

Lizbona, Portugalska
<https://fiblisbon2026.pt/>

22.-24.6.2026

**12th BCRA 2026 Slovenia - 12th International
Conference on the Bearing Capacity of Roads,
Railways and Airfields**

Ljubljana, Slovenija
<https://bcra.si/>

25.-27.6.2026

**ET 2026 - XII Triennial International Scientific
Conference Engineering Today 2026**

Vrnjačka Banja, Srbija
www.et.kg.ac.rs

16.-18.9.2026

IABSE Congress Incheon 2026

Incheon, Južna Koreja
<https://iabse.org/Incheon2026>

16.-18.9.2026

**EUROSTEEL2026 - 11th European Scientific
Conference on Steel and Composite Structures**

Krakov, Poljska
<https://eurosteel2026.org/>

16.-20.9.2026

MOS Sejem

Celje, Slovenija
<https://ce-sejem.si/sejmi/mos/>

23.-25.9.2026

17. kongres Društva gradbenih konstruktorjev Srbije

Zlatibor, Srbija
<https://dgks.grf.bg.ac.rs/>

5.-7.10.2026

**vodiCCCe 2026 - 15th Central European
Congress on Concrete Engineering**

Vodice, Hrvaška
<https://sites.google.com/arhitekt.hr/ccc-2026-vodice/home>

20.-23.10.2026

INTERPRAEVENT 2026

Sapporo, Hokkaido, Japonska
www.kokusaisabo.or.jp/interpraevent2026/english/home-e.htm

19.-20.11.2026

**47. zborovanje gradbenih
konstruktorjev Slovenije**

Portorož, Slovenija
<https://www.sdgk.si>

23.-27.11.2026

WLF7 - 7th World Landslide Forum

Faridabad, Indija
<https://wlf7.org>

3.-9.4.2028

**BAUMA – 35th Edition of the World's Leading
Trade Fair for Construction Machinery,
Building Material Machines, Mining Machines,
Construction Vehicles and Construction Equipment**

München, Nemčija
<https://bauma.de/en/trade-fair/>

KOLEDAR IZOBRAŽEVANJ IZS ZA MSG

Rubriko ureja **Eva Okorn**, ki sprejema predloge
za objavo na e-naslov: gradb.zveza@siol.net

