

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI
ZBORNIK RADOVA



SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI

Izdavač: Građevinski fakultet u Rijeci
Za izdavača: Ivana Štimac Grandić, dekanica
Glavna i odgovorna urednica: Sanja Dugonjić Jovančević

Izdavački savjet:

Mladen Bulić Silvija Mrakovčić
Nana Palinić Vanja Travaš

Urednički odbor:

Gojko Balabanić, Građevinski fakultet u Rijeci
Marijana Butorac, Odjel za matematiku Sveučilišta u Rijeci
Domagoj Lanc, Tehnički fakultet u Rijeci
Ivan Marović, Građevinski fakultet u Rijeci
Matjaž Mikoš, Fakultet za građevinu i geodeziju u Ljubljani
Iva Mrak, Građevinski fakultet u Rijeci
Anamarija Perušić Pribanić, Građevinski fakultet u Rijeci
Boris Podobnik, Građevinski fakultet u Rijeci
Marko Renčelj, Fakultet za građevinu, prometno inženjerstvo i
arhitekturu u Mariboru
Dragan Ribarić, Građevinski fakultet u Rijeci
Luka Skansi, Filozofski fakultet u Rijeci
Paulo Ščulac, Građevinski fakultet u Rijeci
Sanja Šurdonja, Građevinski fakultet u Rijeci
Neira Torić Malić, Građevinski fakultet u Rijeci
Vanja Travaš, Građevinski fakultet u Rijeci
Damir Varevac, Građevinski fakultet u Osijeku
Goran Volf, Građevinski fakultet u Rijeci
Mladen Vukomanović, Građevinski fakultet u Zagrebu

Tehnički urednik: Filip Horvat

Lektorica: Saša Čohar Mančić

Adresa Uredništva: Rijeka, Ulica Radmile Matejčić 3

Grafičko rješenje omota: Alen Karlović

Tisak: 3 Dreams d.o.o

Naklada: 200 primjeraka

ISSN:

2584-6159 (Online)

0350-8552 (Tisak)

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI

ZBORNIK RADOVA

KNJIGA XX

Rijeka, 2017.

GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U RIJECI**ZBORNİK RADOVA
KNJIGA XX****Autori radova:**

Ana BERLJafa	Dolores MARKOVIĆ
Ignacijo BILUŠ	Ivan MAROVIĆ
Ksenija BLAŠKOVIĆ	Iva MRAK
Mladen BULIĆ	Mauro PAMIĆ
Diana CAR-PUŠIĆ	Edita PAPA DUKIĆ
Nina ČEH	Kristina PEDIĆ
Aleksandra DELUKA-TIBLJAŠ	Ines RADOŠEVIĆ MEDVIDOVIĆ
Simona DOBRILLA	Edin REDŽOVIĆ
Zlata DOLAČEK-ALDUK	Željko SMOLČIĆ
Martina FABIĆ	Gorana STIPEČ BRLIĆ
Tomislav FRANKOVIĆ	Paulo ŠĆULAC
Gordan JELENIĆ	Aljaž ŠKERLAVAJ
Gabrijela KABLAR	Ivana ŠTIMAC GRANDIĆ
Anel KARABEGOVIĆ	Sanja ŠURDONJA
Barbara KARLEUŠA	Izabela ŠUTIĆ
Toni KOMADINA	Ksenija TIJANIĆ
Paulina KROLO	Miran TUHTAN
Luka LEŠNIK	Goran VOLF
Alen MALAGIĆ	Elvis ŽIC

Autori priloga:

Sanja DUGONJIĆ JOVANČEVIĆ	Anamarija PERUŠIĆ
Anđela HORVAT	Željko SMOLČIĆ
Paulina KROLO	Sanja ŠURDONJA
Nevenka OŽANIĆ	Neira TORIĆ MALIĆ

PREDGOVOR

U Knjizi XX, Zbornika radova Građevinskog fakulteta u Rijeci, objavljeno je ukupno 14 znanstvenih i stručnih radova nastavnika i studenata Fakulteta te drugih znanstvenika i stručnjaka iz područja djelatnosti Fakulteta. Ovogodišnje izdanje Zbornika sadržajno slijedi Knjigu XIX i dopunjeno je Fakultetskim godišnjakom u kojem su izdvojeni nagrađeni studenti i djelatnici, počasna zvanja i titule, studenti koji su diplomirali, novi doktori znanosti te novi znanstveno-nastavni i umirovljeni djelatnici koji su obilježili djelatnost Fakulteta u 2017. godini. Sudjelovalo je ukupno 38 autora radova i osam autora priloga te 31 recenzent. Sve objavljene radove recenziralo je najmanje dvoje znanstvenika ili stručnjaka iz područja rada, djelatnika Sveučilišta u Rijeci, Građevinskih fakulteta i drugih visokoobrazovnih institucija koji su sastavnice ostalih Sveučilišta u RH, izabranih u znanstvena zvanja te priznati stručnjaci iz lokalne i šire akademske i gospodarske zajednice. Sukladno dosadašnjoj praksi, radovi su klasificirani prema Univerzalnoj decimalnoj klasifikaciji (UDK).

U ovom je izdanju Zbornika predstavljeno osam stručnih i šest znanstvenih radova. Jedan od radova u Knjizi XX objavljen je na engleskom jeziku, a svi ostali na hrvatskom jeziku, uz naslov, sažetak i popis ključnih riječi na oba jezika. Zastupljenost različitih znanstvenih grana i struke ukazuje na široki interes autora. Većina radova je iz područja tehničkih znanosti i uključuje devet radova iz polja građevinarstva, dva iz polja temeljnih tehničkih znanosti, dva iz polja arhitekture i urbanizma te jedan rad iz područja prirodnih znanosti, polja matematike. 12 radova pisano je u koautorstvu studenata završnih godina studija Građevinarstva i njihovih mentora, što potvrđuje ispunjavanje temeljne svrhe Zbornika, a to je mogućnost objavljivanja radova studentima. Zbornik predstavlja idealan medij za uvođenje studenata u znanstveno-istraživački rad, motivira ih i ohrabruje na bavljenje istraživačkim radom, a nastavnike potiče na izdavaštvo sa studentima. Tri rada napisana su u suradnji djelatnika našeg Fakulteta i kolega s drugih fakulteta i instituta u Hrvatskoj i Sloveniji, čime se potvrđuje prepoznatljivost Fakulteta u širem znanstveno-istraživačkom okružju. U pet od 14 navedenih radova, obrađene su teme laboratorijskih ispitivanja i korištena je oprema laboratorija Fakulteta, nabavljena sredstvima iz projekta RISK (Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci) kojeg su sufinancirali Europski fond za regionalni razvoj (EFRR) i Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta RH.

Zbornik je tiskan u crno-bijeloj tehnici, a cjelokupni tekst Zbornika, uz originalne ilustracije u boji, dostupan je na mrežnoj stranici Fakulteta, u dijelu izbornika Izdavačka djelatnost:

<https://www.gradri.uniri.hr/hr/izdavacka-djelatnost/zbornik-radova.html>, te na portalu znanstvenih časopisa Republike Hrvatske, Hrčak <https://hrcak.srce.hr/zbornik-radova-gfri>.

Zahvaljujem svim autorima radova i priloga, kao i svim recenzentima koji su uložili svoje vrijeme, trud i znanje u objavi Knjige XX, Zbornika radova Građevinskog fakulteta u Rijeci. Zahvaljujem svim članovima Uredničkog odbora na aktivnoj suradnji u procesu pripreme i izrade Zbornika, njihovim prijedlozima i savjetima pri donošenju odluka u cilju postizanja kvalitete. Zahvaljujem lektorici Saši Čohar Mančić na predanom radu u jezičnim korekcijama svih radova i priloga, kao i tehničkom uredniku Filipu Horvatu koji je zaslužan za ispunjavanje tehničkih i estetskih standarda. Također zahvaljujem bivšim urednicima koji su svojim iskustvom i znanjem, kroz savjete i razgovor, pomogli da ovo izdanje dosegne kvalitetu prethodnih.

Glavna i odgovorna urednica

Sanja Dugonjić Jovančević

SADRŽAJ

Gabrijela KABLAR, Martina FABIĆ, Barbara KARLEUŠA, Goran VOLF Zaštita krških izvorišta vode za piće u Istri izgradnjom sustava odvodnje za mala ruralna naselja.....	9
Anel KARABEGOVIĆ, Elvis ŽIC, Ignacijo BILUŠ, Aljaž ŠKERLAVAJ Eksperimentalno određivanje lokalnih i linijskih koeficijenata gubitaka u cijevnom sustavu pod tlakom.....	27
Mauro PAMIĆ, Elvis ŽIC, Ignacijo BILUŠ, Luka LEŠNIK Fizikalni model formiranja graničnog sloja.....	43
Ana BERLJafa, Ivan MAROVIĆ, Diana CAR-PUŠIĆ Analiza učinka rada bagera primjenom metode kronometraže.....	59
Ksenija TIJANIĆ, Diana CAR-PUŠIĆ, Zlata DOLAČEK-ALDUK Analiza troškova kvalitete odabranih građevinskih radova.....	77
Aleksandra DELUKA-TIBLJAŠ, Sanja ŠURDONJA, Dolores MARKOVIĆ Primjena načela održive mobilnosti na unaprjeđenju prometnih uvjeta manjih gradova.....	93
Željko SMOLČIĆ, Ksenija BLAŠKOVIĆ Dijagrami interakcije za armiranobetonski šuplji kružni poprečni presjek.....	111
Izabela ŠUTIĆ, Paulina KROLO, Mladen BULIĆ Nelinearna analiza vitkih čeličnih greda.....	127
Ivana ŠTIMAC GRANDIĆ, Tomislav FRANKOVIĆ, Paulo ŠĆULAC, Toni KOMADINA Operacionalna modalna analiza nathodnika Malonji.....	141

Alen MALAGIĆ, Edita PAPA DUKIĆ Usporedba izobara glavnih napreznja dobivenih analitički i eksperimentalno polariskopom.....	159
Simona DOBRILLA, Nina ČEH, Miran TUHTAN, Gordan JELENIĆ Experimental Analysis of Structure Response to Non-uniform Support Excitation.....	175
Iva MRAK, Edin REDŽOVIĆ Tendencije u suvremenim fasadama u Rijeci.....	189
Gorana STIPEČ BRLIĆ Neboderi- grad među oblacima.....	207
Ines RADOŠEVIĆ MEDVIDOVIĆ, Kristina PEDIĆ Matrične faktorizacije.....	227
FAKULTETSKI GODIŠNJAK	
Studenti koji su diplomirali.....	245
Obranjeni doktorski radovi.....	248
Počasna zvanja i titule.....	254
Nagrade i priznanja studentima.....	257
Nagrade i priznanja djelatnicima.....	259
Umirovljeni djelatnici.....	262
Novi znanstveno-nastavni djelatnici.....	265

ZAŠTITA KRŠKIH IZVORIŠTA VODE ZA PIĆE U ISTRI IZGRADNjom SUSTAVA ODVODNJE ZA MALA RURALNA NASELJA

PROTECTION OF KARST SPRINGS USED FOR WATER SUPPLY IN ISTRIA BY BUILDING SEWAGE SYSTEMS FOR SMALL RURAL SETTLEMENTS

Gabrijela Kablar*, Martina Fabić*, Barbara Karleuša*, Goran Volf*

Sažetak

Odvodnja otpadnih voda u Republici Hrvatskoj s ukupno 6.762 naselja grupirana je u 736 aglomeracija, od čega 468 aglomeracija ima opterećenje do 2.000 ekvivalent stanovnika (ES). Iako se zahtjevi Direktive o pročišćavanju komunalnih otpadnih voda odnose provenstveno na aglomeracije veće od 2.000 ES, neophodno je adekvatno zbrinjavati otpadne vode i manjih aglomeracija, pogotovo u osjetljivim područjima kao što su zone sanitarne zaštite izvorišta vode za piće. U cilju zaštite izvorišta vode u Istarskoj županiji izrađena je studija „Organizacija, izgradnja i održavanje sustava odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda za mala naselja u obuhvatu vodozaštitnih područja u Istarskoj županiji” te je osnovano trgovačko društvo IVS – Istarski vodozaštitni sustav d.o.o., koje je u vlasništvu svih gradova i općina Istarske županije čiji je zadatak realizacija navedene Studije. Studija obuhvaća 173 naselja u zonama sanitarne zaštite izvorišta vode za piće na području Istre, u kojima živi oko 38.000 stanovnika. U ovom radu će se prikazati rješenja dvaju sustava odvodnje otpadnih voda za mala naselja u Istri koja su izrađena u okviru dvaju diplomskih radova: sustav za naselje Lobarika i sustav za naselja Rapavel, Anžići i Smolići. Cilj rada je istaknuti problematiku zaštite izvorišta vode za piće u kršu, mogućnosti zaštite izvorišta izgradnjom odgovarajućih sustava odvodnje i uređaja za pročišćavanje otpadnih voda, probleme koji se javljaju pri projektiranju razdjelnih sustava odvodnje otpadnih voda za aglomeracije manje od 2.000 ES kao i probleme koji se mogu očekivati u budućnosti pri korištenju sustava.

*Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: gabrijela.kablar_martina.fabic@student.uniri.hr; barbara.karleusa.goran.volf@uniri.hr

Ključne riječi: *sustav odvodnje, uređaj za pročišćavanje otpadnih voda, Istarski vodozaštitni sustav, zaštita krških izvorišta, aglomeracije manje od 2.000 ES*

Abstract

Wastewater drainage for 6.762 settlements in the Republic of Croatia is grouped in 736 agglomerations, of which 468 agglomerations have loads of up to 2.000 population equivalent (PE). Although the requirements of the Urban Wastewater Treatment Directive apply to agglomerations of more than 2.000 PE, it is necessary to adequately dispose wastewater of these smaller agglomerations, particularly in sensitive areas such as drinking water protection zones. In order to protect drinking water sources in the Istrian County, the study "Organization, construction and maintenance of drainage and wastewater treatment systems for small settlements in drinking water protection areas of the Istrian County" was prepared and the Istrian Water Protection System Ltd., whose task is the realization of the above mentioned Study, was established. The Study included 173 settlements in the areas of drinking water protection zones, where about 38.000 inhabitants live. This paper presents the designs of two wastewater drainage systems for small settlements in Istria, which were developed within two graduation theses: for the settlement Lobarika and for settlements Rapavel, Anžići and Smolići. The aim of this paper is to highlight the problem of drinking water sources protection in karst areas, the possibility of protection by construction of appropriate sewage systems and wastewater treatment plants, problems encountered in the design of separate systems for agglomerations less than 2.000 PE as well as problems that can be expected in the future when these systems will be in use.

Key words: *sewerage system, waste water treatment plant, Istrian Water Protection System, protection of drinking water sources in karst regions, agglomerations with less than 2.000 PE*

1. Uvod

U ovom radu prikazat će se problematika zaštite krških izvorišta vode za piće u Istarskoj županiji izgradnjom sustava odvodnje uključujući uređaje za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) za mala naselja ruralnog karaktera koja se nalaze u zonama sanitarne zaštite.

Zaštita izvorišta vode za piće (odnosno za ljudsku potrošnju) u Hrvatskoj je definirana kroz više zakonskih i podzakonskih akata od kojih su najznačajniji: Zakon o vodama [1], Pravilnik o utvrđivanju zona sanitarne zaštite izvorišta [2], Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda [3], Odluka o određivanju osjetljivih područja [4], a koji su usklađeni s europskom pravnom stečevinom.

U Zakonu o vodama [1] posebno se ističu zaštićena područja među koja se ubrajaju vodna tijela koja su namijenjena ljudskoj potrošnji i osjetljiva područja u kojima je zbog postizanja ciljeva kakvoće voda potrebno provesti

višu razinu ili viši stupanj pročišćavanja komunalnih otpadnih voda od propisanog Pravilnikom o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda [3]. Također se navodi obaveza donošenja odluke o zaštiti izvorišta, odluke o odvodnji otpadnih voda i sl., dok su navedeni aspekti detaljno obrađeni u podzakonskim aktima.

Pravilnik o utvrđivanju zona sanitarne zaštite za izvorišta [2] kod zahvaćanja podzemne vode iz vodonosnika s pukotinskom i pukotinsko-kavernoznom poroznosti u koje se svrstavaju krška izvorišta definira četiri zone zaštite te među mjerama u III. zoni zaštite zabranjuje ispuštanje nepročišćenih otpadnih voda. Stoga je za naselja u toj i u strožim zonama neophodno graditi nepropusne sustave odvodnje te otpadne vode pročišćavati i tek nakon toga ispuštati min. u III. zoni.

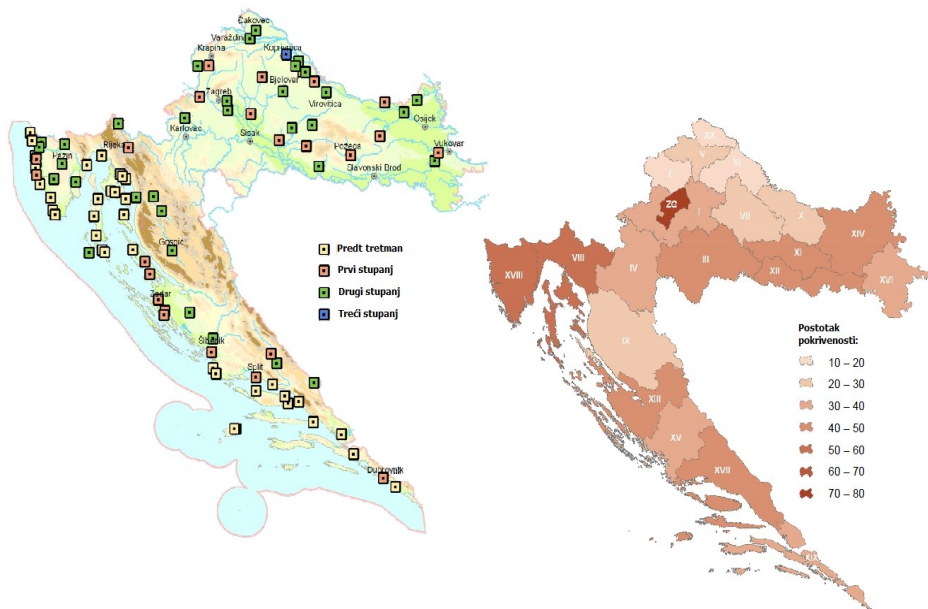
Direktiva o odvodnji i pročišćavanju komunalnih otpadnih voda EU [5] se prvenstveno bavi aglomeracijama većim od 2.000 ES (ekvivalent stanovnika), dok se Pravilnikom o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda [3] određuje stupanj pročišćavanja otpadnih voda za aglomeracije različitih opterećenja. Za aglomeracije manje od 2.000 ES (468 aglomeracija, što čini 63% aglomeracija u RH) navodi se: „Komunalne otpadne vode iz sustava javne odvodnje aglomeracija s opterećenjem manjim od 2.000 ES neovisno o osjetljivosti područja pročišćavaju se odgovarajućim pročišćavanjem prije ispuštanja otpadnih voda u prijemnik.“ Odgovarajuće pročišćavanje ovisi o osjetljivosti područja (vodnog tijela) u koje se otpadna voda ispušta nakon pročišćavanja.

Na području Istarske županije važnost odgovarajućeg zbrinjavanja otpadnih voda malih naselja ruralnog karaktera je velika s obzirom da se 173 naselja nalazi u zonama sanitarne zaštite izvorišta vode za ljudsku potrošnju.

U ovom radu će se, nakon kraćeg pregleda stanja sustava odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda u Hrvatskoj i u Istarskoj županiji, prikazati projektna rješenja dvaju sustava odvodnje za naselja koja se nalaze u zonama sanitarne zaštite izvorišta vode za piće: sustav odvodnje otpadnih voda za naselje Lobarika (uključujući naselja Radeki polje i Glavica) [6] i sustav za naselja Rapavel, Anžići i Smolići [7]. Cilj ovog rada je istaknuti problematiku zaštite izvorišta vode za piće u kršu, mogućnosti zaštite izvorišta izgradnjom odgovarajućih sustava odvodnje i UPOV-a, probleme koji se javljaju pri projektiranju razdjelnih sustava odvodnje otpadnih voda za aglomeracije manje od 2.000 ES kao i probleme koji se mogu očekivati u budućnosti vezane za pogon i održavanje tih sustava.

2. Pregled stanja odvodnje i zbrinjavanja otpadnih voda u Hrvatskoj

U Hrvatskoj, od ukupne populacije koju čini 4.437.460 stanovnika, na sustave javne odvodnje je priključeno 1.923.000 stanovnika, odnosno 43%, od kojih je samo 28%, odnosno 1.245.500 stanovnika priključeno na uređaje za pročišćavanje otpadnih voda. Od toga 7% ima samo predtretman, 5% ima prvi stupanj pročišćavanja, 15% ima drugi stupanj pročišćavanja, a samo 0,3% je priključeno na uređaj s trećim stupnjem pročišćavanja (Slika 1) [8].



Slika 1. Pregled populacije spojene na kanalizacijski sustav te izgrađenih UPOV-a u Republici Hrvatskoj [8].

Pregled odvodnje te zbrinjavanja otpadnih voda po veličini aglomeracije prikazan je u Tablici 1 [9]. Od ukupno 6.766 naselja u Republici Hrvatskoj grupiranih u 736 aglomeracije, 468 aglomeracija, odnosno čak 63 % je manje od 2.000 ES, što čini ukupno opterećenje od 421.199 ES. To opterećenje čini ukupan broj naselja od 2.649, odnosno 580.988 stanovnika. Stanovništvo je u 849 naselja priključeno na javni sustav odvodnje, dok 1.800 naselja ima individualna rješenja zbrinjavanja otpadnih voda (uglavnom septičke i sabirne jame ili individualne ispuste u cestovne i melioracijske kanale) [8].

Tablica 1. Pregled odvodnje te zbrinjavanja otpadnih voda u RH prema veličini aglomeracije [9].

Veličina aglomeracije		0-2.000	2.001-10.000	10.001-15.000	15.001-150.000	>150.000	Ukupno
Broj sustava		468	205	31	51	4	759
Ukupno opterećenje [ES]		421.199	887.602	407.072	1.987.445	2.001.521	5.704.839
Broj naselja	Sustav	2.649	2.069	544	1.354	150	6.766
	Javna kanalizacija	849	759	249	637	135	2.629
	Pojedinačna kanalizacija	1.800	1.310	295	717	15	4.137
Populacija	Sustav	580.988	856.514	300.353	1.372.522	1.327.083	4.437.460
	Javna kanalizacija	366.129	682.829	258.497	1.277.586	1.325.215	3.910.256
	Pojedinačna kanalizacija	214.589	137.685	41.586	94.936	1.868	527.204
	Spojeno	30.165	124.475	101.370	707.318	971.694	1.935.022

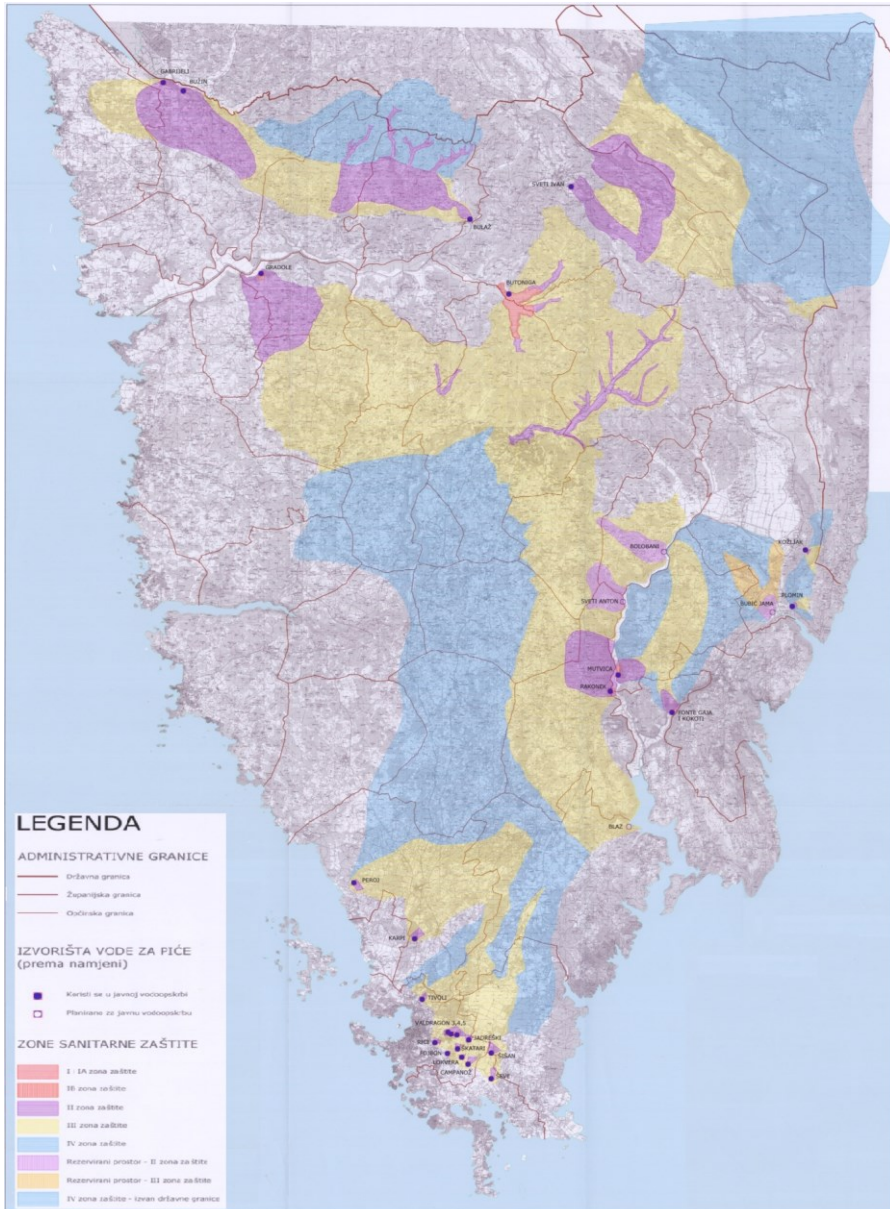
3. Pregled stanja odvodnje i zbrinjavanja otpadnih voda u Istarskoj županiji

Najveći dio Istarske županije čini vodopropusni krš. Zbog velike propusnosti pokrovnog sloja podzemlje je izrazito osjetljivo na onečišćenje s površine te je oko 70% površine Županije pod određenim režimom vodozaštite [10]. Odgovarajuće zbrinjavanje otpadnih voda naselja u Istarskoj županiji stoga predstavlja visoki prioritet. Odlukom o zonama sanitarne zaštite izvorišta vode za piće u Istarskoj županiji 2005. su definirane [11] te 2011. revidirane [12], zone koje su prikazane na Slici 2.

Prema Odluci [11], [12], za zaštitu izvorišta podzemne vode koja se koristi za javnu vodoopskrbu definirano je sljedeće:

- U IV. zoni sanitarne otpadne vode treba rješavati izgradnjom sustava javne odvodnje s drugim stupnjem pročišćavanja, a gdje nema tehničke ni ekonomske opravdanosti, otpadne vode pročišćavati na vlastitom uređaju drugog ili odgovarajućeg stupnja pročišćavanja i ispuštanjem u podzemlje putem upojnog bunara ili drenaže, odnosno ponovno koristiti za tehnološku vodu ili za potrebe navodnjavanja.
- U III. zoni sanitarne otpadne vode potrebno je prikupljati nepropusnim sustavom i odvoditi izvan zone, a gdje za to nema uvjeta, ispuštati u podzemlje nakon drugog ili odgovarajućeg stupnja pročišćavanja ili, ako je moguće, ponovo koristiti za tehnološku vodu ili za potrebe navodnjavanja. Individualni stambeni objekti na područjima gdje nema tehničke ni ekonomske opravdanosti za gradnju sustava javne odvodnje moraju imati septičku jamu ili tipski (biološki ili drugi odgovarajući)

uređaj, s ispuštanjem otpadne vode putem upojnog bunara ili disperzivno u podzemlje.



Slika 2. Zone sanitarne zaštite izvorišta vode za piće u Istarskoj županiji prema Odluci [11], [12].

- U II. zoni je za sanitarne otpadne vode obvezno izgraditi vodonepropusni sustav javne odvodnje s odvodnjom otpadne vode izvan zone te na sustav

priključiti otpadne vode postojećih objekata ili, iznimno za mala naselja do 2.000 ES-a, izgraditi uređaj koji će pročititi otpadne vode te izgraditi ispušt, a sve u skladu s važećim propisom o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda. Objekti za koje nije planirano priključenje na sustav javne odvodnje moraju imati tipski uređaj drugog ili odgovarajućeg stupnja pročišćavanja s ispuštanjem otpadnih voda izvan zone ili izuzetno sakupljati otpadne vode u nepropusnu sabirnu jamu s kontrolom pražnjenja putem ovlaštenih institucija.

- U I. zoni sanitarne otpadne vode moraju se odvesti nepropusnom kanalizacijom izvan zone.

Zone sanitarne zaštite izvorišta pretežno se nalaze u unutrašnjem dijelu poluotoka gdje se, uz nekoliko gradova (npr. Pazin, Buzet), nalazi velik broj malih ruralnih naselja do 2.000 ES.

Otpadne vode u tim naseljima zbrinjavale su se u prošlosti putem crnih ili septičkih jama te u nekim slučajevima čak i direktnim ispuštanjem u okoliš. Takvo rješenje ugrožavalo je vodne resurse koji se koriste za piće te je 2000. godine u cilju zaštite izvorišta izrađena studija „Organizacija, izgradnja i održavanje sustava odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda za mala naselja u obuhvatu vodozaštitnih područja u Istarskoj županiji" [13] koja je trebala pronaći odgovarajuća rješenja za to područje. Studija je bila temelj za osnivanje trgovačkog društva IVS – Istarski vodozaštitni sustav d.o.o., koje je u vlasništvu svih gradova i općina Istarske županije [14]. Društvo je osnovano sa zadatkom realizacije navedene Studije. Studija obuhvaća 173 naselja u zonama sanitarne zaštite izvorišta vode za piće na području Istre, u kojima živi oko 38.000 stanovnika. Kapaciteti uređaja za pročišćavanje otpadnih voda iznose od najmanje 100 do najviše 500 ES. Dosadašnje glavne aktivnosti IVS-a bile su pretežno vezane na pripremu projektne dokumentacije za kanalske mreže i UPOV-e i praćenje izgradnje, a uskoro će područje djelovanja biti i pružanje vodnih usluga.

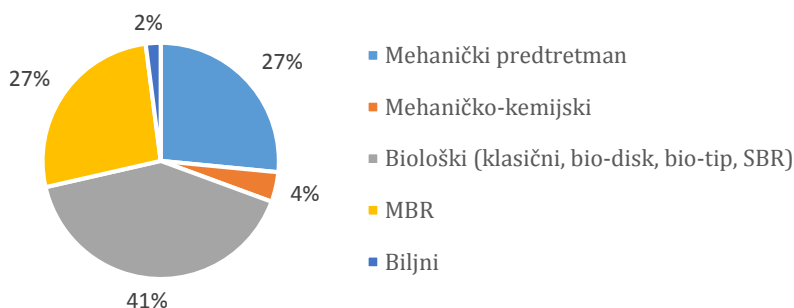
Prema Izvješću o stanju u prostoru Istarske županije 2007-2012., u 2011. godini priključenost stanovništva Istarske županije na sustave javne odvodnje otpadnih voda bila je procijenjena na oko 57%, a ukupan broj UPOV-a je iznosio 33 [15]. U radnoj verziji Izvješća o stanju u prostoru Istarske županije 2013.-2016. (Tablica 2) navodi se da je ukupno izgrađeno 49 UPOV-a, što je povećanje od 48% u odnosu na stanje u 2011. godini [16]. Iz Slike 3 razvidno je da su na UPOV-ima implementirana različita tehnološka rješenja obrade otpadnih voda. Od 49 izrađenih UPOV-a, u Istarskoj županiji 30 (61%) ima kapacitet manji od 2.000 ES. Od 13 UPOV-a izgrađenih u periodu od 2013. do 2016. godine njih 11 (85%) izgrađeno je za aglomeracije manje od 2.000 ES pretežno ruralnog karaktera te uz 2. ili 3. stupanj pročišćavanja otpadnih voda.

Tablica 2. Izgrađeni UPOV-i u Istarskoj županiji s navedenim stupnjem i vrstom pročišćavanja [16].

Naziv (lokacija) UPOV	Izvedeni kapacitet (ES)	Izvedeni stupanj pročišćavanja	Tip UPOV-a
UPOV CUVI	64.900	P	mehanički predtretman
UPOV VALKANE (G. Pula)	35.000	P	mehanički predtretman
UPOV MARLERA	34.500	P	mehanički predtretman
UPOV SAVUDRIJA	33.000	P	mehanički predtretman
UPOV UMAG	33.000	P	mehanički predtretman
UPOV NOVIGRAD	33.000	1	mehaničko-kemijski
UPOV POREČ IUG	26.000	P	mehanički predtretman
UPOV POREČ-SIEVER	24.000	P	mehanički predtretman
UPOV PETALON	18.000	1	mehaničko-kemijski
UPOV LANTERNA	16.400	P	mehanički predtretman
UPOV PEROI	14.000	P	mehanički predtretman
UPOV PREMANTURA	8.400	P	mehanički predtretman
UPOV LABIN	7.500	2	klasični biološki
UPOV BUZET	7.200	2	biološki
UPOV PAZIN	7.000	2	biološki
UPOV BUMBIŠTE	7.000	P	mehanički predtretman
UPOV DUGA UVALA	5.500	P	mehanički predtretman
UPOV BUJE	4.000	2	biološki
UPOV ČERVAR-PORAT	3.600	2	biološki
UPOV KANFANAR	1.900	3	MBR
UPOV OPĆINE BALE	2 x 750	3	MBR
UPOV POTPIČAN	1.150	2	klasični biološki
UPOV BRTONIGLA	1.000	2	bio-disk
UPOV ROČ	2 x 500	3	MBR
UPOV OTOK SV. NIKOLA	700	P	mehanički predtretman
UPOV ŽMINJ	700	2	biljka-uređaj
UPOV GROŽNJAN	500	2	bio-disk
UPOV KOROMAČNO	500	2	klasični biološki
UPOV NOVA VAS	400	2	bio-uređaj
UPOV OPRTALI	400	3	MBR
UPOV VIŽINADA	2 x 200	3	MBR
UPOV PRHATI	2 x 200	3	MBR
UPOV RUDANI	2 x 200	3	MBR
UPOV TOPIT	2 x 200	3	MBR
UPOV BARBAN	350	2	bio-disk
UPOV KAŠČERGA	2 x 150	2	bio-tip
UPOV VRH	2 x 150	2	bio-tip
UPOV PLOMIN LUKA	300	2	bio-disk
UPOV GRAČIŠĆE	265	3	MBR
UPOV PIČAN	250	2	klasični biološki
UPOV VIŠNJAN	200	2	bio-disk
UPOV SV. LOVREČ	200	3	MBR
UPOV IND. ZONA ŽMINJ	200	2	SBR
UPOV ČESARI-BAŠIĆI	150	3	MBR
UPOV VIŠKOVICI	100	3	MBR
UPOV MARČENEGLA	100	3	AA MBR
UPOV GRDOSELO	100	3	SBR
UPOV ŠČULCI-PALADINI	100	2	bio-tip
UPOV DRAGUĆ	100	2	bio-tip
UKUPNO	396.365		

UPOV izgrađeni u razdoblju 2013.-2016.god.

(Izvor podataka: Trgovačka društva za javnu odvodnju, općine i PPIŽ)



Slika 3. Pregled udjela pojedinih tipova (tehnoloških rješenja) UPOV-a u Istarskoj županiji.

Prema Studiji [13] bilo je planirano u prvoj fazi ukupno izgraditi kanalizacijsku mrežu s UPOV-ima za 86 malih naselja.

Iz podataka prikazanih u Tablici 3. jasno se vidi da se kontinuirano ulaže u izgradnju sustava odvodnje te da je u periodu od 2013. do 2016. godine izgrađeno preko 247 km kanalske mreže, odnosno da je duljina mreže ukupno povećana za oko 24%.

Tablica 3. Duljina kanalske mreže u 2013., 2014. i 2015. godini, ukupan porast duljine mreže i postotak izrađene mreže u periodu 2013-2016 [16].

Trgovačka društva i općine nadležne za javnu odvodnju	2013. (km)	2014. (km)	2015. (km)	2016. (km)	Ukupan porast duljine mreže (km)	% porasta duljine mreže
Park odvodnja d.o.o. Buzet	26,95	27,03	29,23	29,26	2,31	9
Usluga odvodnja d.o.o. Pazin	36,45	36,45	37,76	42,46	6,01	16
Pragrande d.o.o. Pula	402,30	414,72	425,59	459,45	57,12	14
6. maj odvodnja d.o.o. Umag	189	192	195	198	9	5
IVS-Istarski vodozaštitni sustav d.o.o. Buzet	12,21	22,14	24,02	36,41	24,2	198
Odvodnja Rovinj d.o.o. Rovinj	56	60	60	63	7	13
Odvodnja Poreč d.o.o. Poreč	166,53	167,33	212,21	263,47	96,94	58
Mandalena d.o.o. Marčana	4,07	4,51	4,96	5,09	1,02	25
*Općina Žminj	*	*	*	5,72	-	-
Limska Draga d.o.o. Kanfanar	6,71	7,92	7,92	7,92	1,21	18
Vodovod Labin d.o.o.	97,86	97,86	97,86	97,86	-	0
Albanež d.o.o.	39	47	59	73	34	87
**Općina Bale	**	**	**	2,82	-	-
Općina Barban	8,87	8,87	8,87	8,87	0	0
Općina Gračišće	2,80	2,80	2,80	2,80	0	0
UKUPNO	1.048,75	1.088,63	1.165,22	1.296,13	247,38	24

* općina Žminj: nema podatka o duljini kanalizacijske mreže u 2013., 2014., i 2015. god.

**općina Bale: u razdoblju 2013.-2016. izgrađeno 0,52 km kanalizacijske mreže

(Izvor podataka: Trgovačka društva za javnu odvodnju (javni isporučitelji vodne usluge javne odvodnje i općine)

Intenzivna je bila izgradnja sustava odvodnje u većim gradovima Poreč (96,94 km) i Pula (57,12 km) te općini Medulin (34 km), kao i izgradnja sustava odvodnje malih naselja za koju je nadležan IVS (24,2 km) i kod koje je došlo gotovo do utrostručenja njene duljine (produljenje za oko 200%).

4. Primjeri rješavanja sustava odvodnje otpadnih voda malih naselja u zonama sanitarne zaštite u Istri

Za prikaz rješenja odvodnje otpadnih voda malih ruralnih naselja u Istarskoj županiji, koja se nalaze u prostoru zona sanitarne zaštite izvorišta vode za piće, odabrana su dva primjera: sustav odvodnje za naselje Loborika i sustav odvodnje za naselja Rapavel, Anžići i Smolići (Slika 4). Projektna rješenja su izrađena u [6] i [7].

Pri izradi rješenja poštovala su se odredbe Prostornog plana Istarske županije, općinskih prostornih planova uređenja (Općine Marčana i Općine Višnjan), Odluka o zonama sanitarne zaštite izvorišta vode za piće Istarske županije [11], [12], studija „Organizacija, izgradnja i održavanje sustava odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda za mala naselja u obuhvatu vodozaštitnih područja u Istarskoj županiji" [13] te svi relevantni zakoni i podzakonski akti. Temeljem navedenih dokumenata odvodnja otpadnih voda za navedena naselja treba se rješavati modelom razdjelne kanalizacije, što znači da se sanitarna otpadna voda odvodi odvojenim sustavom od oborinske vode te se treba obraditi na UPOV-ima s odgovarajućim pročišćavanjem.

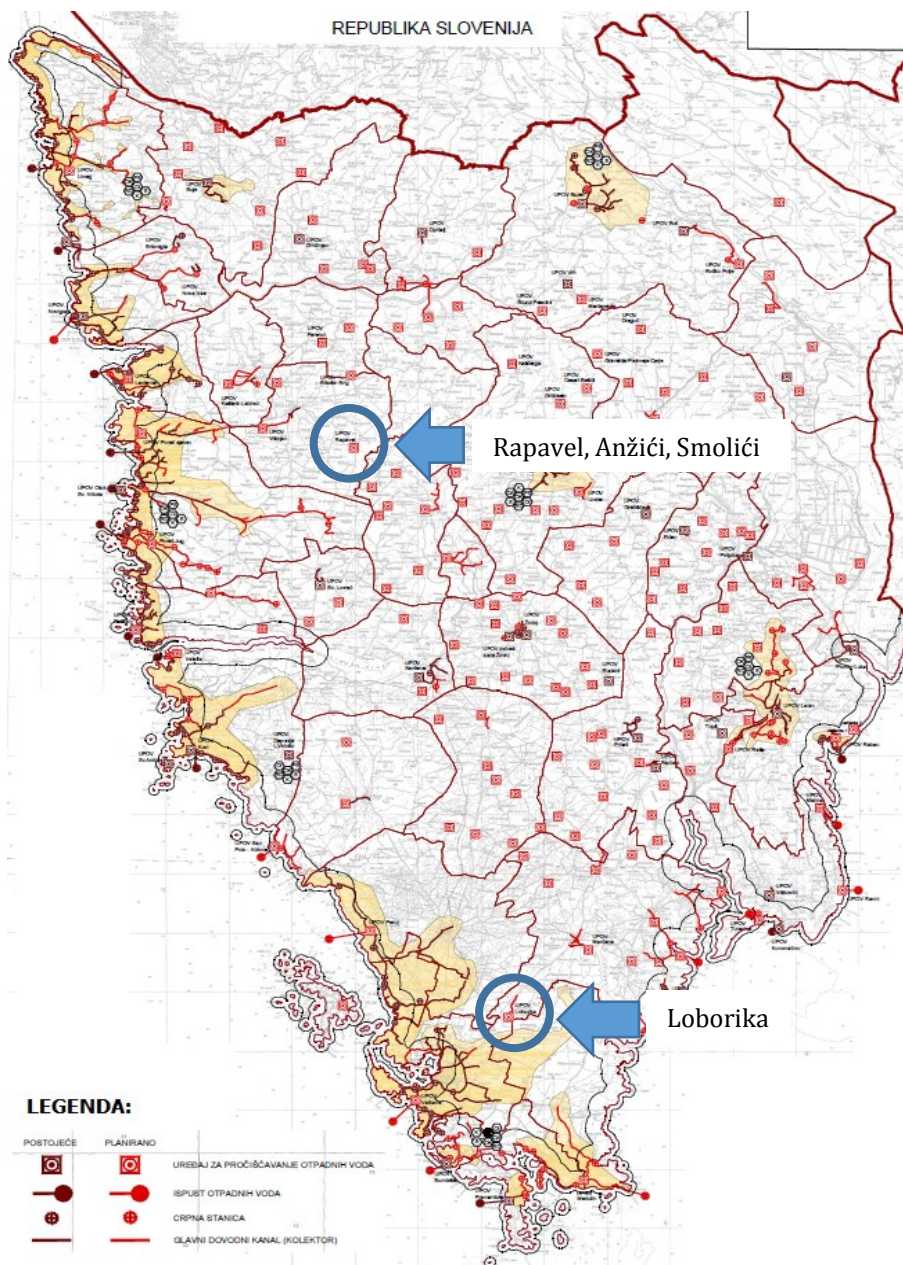
Naselje Loborika nalazi se unutar III. zone sanitarne zaštite bunara: Valdragon i Jadreški, a naselja Rapavel, Anžići i Smolići u III. zoni sanitarne zaštite izvora Gradole.

Prema Pravilniku o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda [3], standard za efikasnost pročišćavanja otpadnih voda za III. zonu sanitarne zaštite za aglomeracije manje od 10.000 ES predviđa:

- suspendirane tvari - min. smanjenje ulaznog opterećenja 90% ili koncentracija na izlazu ≤ 35 mg/l
- biokemijska potrošnja kisika BPK₅ - min. smanjenje ulaznog opterećenja 70% ili koncentracija na izlazu ≤ 25 mgO₂/l
- kemijska potrošnja kisika KPK - min. smanjenje ulaznog opterećenja 75% ili koncentracija na izlazu ≤ 125 mg/l.

Hidraulički proračun oba sustava odvodnje je proveden u računarskom programu Urbano Canalis tvrtke Studio ARS d.o.o., statički proračun cijevi

korištenjem računarskog programa Vargon istoimene tvrtke te crpki korištenjem računarskog programa WebCAPS tvrtke Grundfos.



Slika 4. Infrastrukturni sustavi, odvodnja otpadnih voda i sustav gospodarenja otpadom, [17], uz naznačena naselja Loborika i Rapavel, Anžiči i Smolići.

4.1. Zbrinjavanje otpadnih voda naselja Loborika

Prema Studiji [13], za naselje Loborika, koje se nalazi u Općini Marčana, predviđena je gradnja MBR (membranski bioreaktor) uređaja kapaciteta 1.000 ES kojim se postiže izuzetno visoka učinkovitost pročišćavanja.

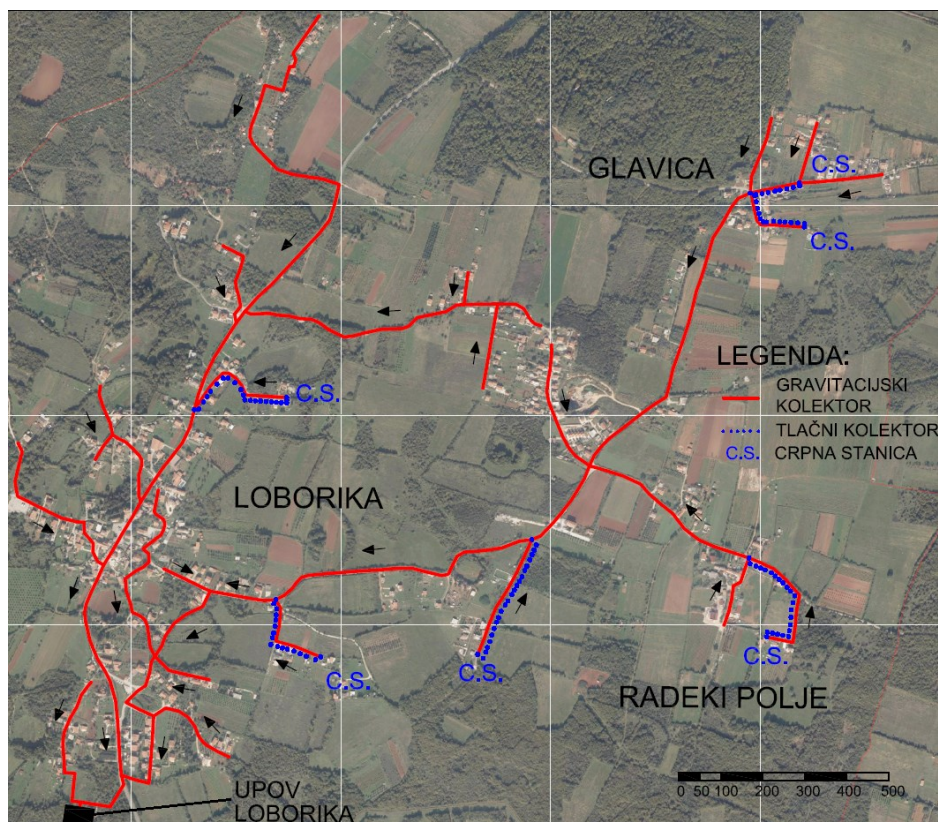
U rješenju koje je izrađeno u [6] rješava se odvodnja naselja Loborika, ali i obližnjih naselja Radeki polje i Glavica. Opterećenje na UPOV-u na kraju 30 godišnjeg projektnog razdoblja definirano je u većem iznosu od onog navedenog u Studiji [13]. Naime, ukupan broj stanovnika prema popisu stanovništva iz 2011. iznosi 844 stanovnika te, ukoliko se uzme u obzir relativni porast broja stanovnika dobiven u odnosu na broj stanovnika iz popisa 2001., on iznosi 4,68%, što bi na kraju 30-godišnjeg projektnog razdoblja za sva tri naselja bilo 3.328 stanovnika. Predviđa se i boravak 343 turista.

Temeljem postavljanja trase sustava odvodnje naselja Loborika, položaj UPOV-a bio je unaprijed definiran prema Prostornom planu Istarske županije (Slika 4). Pri izradi rješenja, u radu [6] se maksimalno primjenjivao gravitacijski način odvodnje, ali je na pojedinim mjestima zbog konfiguracije terena bilo nemoguće funkcionalno spojiti pojedine dijelove naselja gravitacijski na glavni kanal te je na tim mjestima predviđena gradnja crpnih stanica s pripadnim tlačnim cjevovodima (Slika 5). Ukupna duljina gravitacijskih kanala projektiranog sustava iznosi 11.800 m, a ukupna duljina tlačnih kolektora iznosi 1.460 m. Na mreži se nalazi preko 300 revizijskih i 21 kaskadno okno.

Odabrane su cijevi i okna od polietilena visoke gustoće koji se karakterizira kao elastični materijal, tzv. PEHD cijevi. Za gravitacijski kolektor odabiru se orebrene cijevi tvrtke Vargon, prepoznatljive po vanjskoj orebrenoj površini crne boje te glatkoj i svijetlo zelenoj unutrašnjosti cijevi. Hidrauličkim proračunom definiran je profil cijevi za gotovo cijeli sustav s DN 250 te iznimno jedna dionica s DN 315, neposredno prije UPOV. Tlačni kolektor izvodi se od cijevi Vargoplen. Odabiru se cijevi PN 10 profila DN 90. Odabiru se revizijska okna koja su također iz iste serije proizvoda kao i odabrane cijevi. Budući da su odabrane cijevi profila DN 250 i DN 315, revizijska okna se postavljaju na udaljenostima manjim od 50 m.

Projektom se predviđa 6 crpnih stanica kojima se savladavaju visinske prepreke. Crpne stanice izvode se kao male tipske. Svaka crpna stanica oprema se dvjema potopljenim crpkama, potrebnim armaturnim i oblikovnim komadima, ima otvor za ventilaciju i otvor za održavanje, nadzor i rukovanje crpkama. Crpni bazen izvodi se od prefabriciranih betonskih elemenata koji oblikuju vodonepropusnu konstrukciju. Odabrane su centrifugalne potopne crpke proizvođača Grundfos koje su prilagođene

potiskivanju otpadnih nepročišćenih voda. Pumpe se u radu izmjenjuju pa u slučaju kvara jedne, rad se automatski prebacuje na drugu pumpu.



Slika 5. Pregledna situacija sustava odvodnje i UPOV-a naselja Loborika [6].

4.2. Naselja Rapavel, Anžići i Smolići

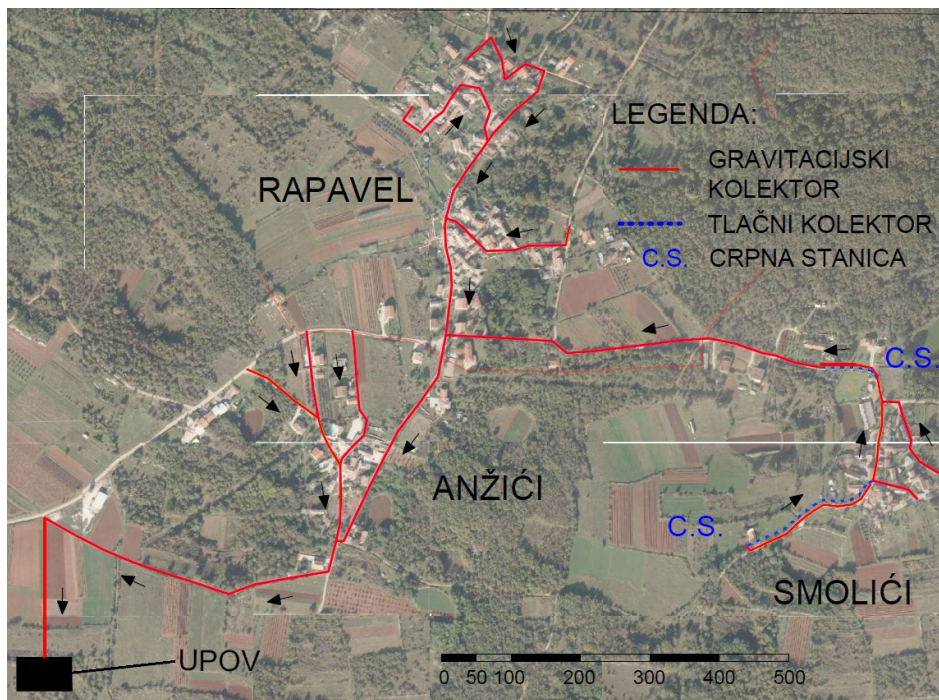
Naselja Rapavel, Anžići i Smolići nalaze se u Općini Višnjan i trenutno nemaju izgrađen sustav odvodnje otpadnih voda, no uskoro se očekuje početak izgradnje. Gradnja sustava financirana je EU fondovima, i to Programom ruralnog razvoja RH 2017–2020.

Prema Studiji [13], predviđena je gradnja BIOTOP uređaja za biološko pročišćavanje kapaciteta 200 ES kojim se postiže 2. stupanj pročišćavanja, a uređaj će biti smješten na području naselja Anžići s ispuštanjem pročišćene vode u teren.

U radu [7] se predviđa da će zbog planirane veličine građevinskog zemljišta i uslijed poticanja razvoja ruralnih područja na kraju projektnog razdoblja od 30 godina broj stanovnika sa 88 porasti na 255 unatoč

sadašnjem trendu opadanja broja stanovnika (prema podacima iz popisa stanovništva RH 2001. i 2011.) te je procijenjeni broj turista 48.

Tijekom izrade projektnog rješenja kanalske mreže sustava odvodnje težilo se vođenju kanala paralelno s padom terena i na minimalnoj dubini polaganja kako bi se osiguralo otjecanje otpadne vode sa slobodnim vodnim licem. Za gravitacijske kolektore odabrane su PEHD cijevi profila DN 250, a za tlačne cijevi DN 110 (Slika 6.). Revizijska okna od istog materijala postavljena su na početku i na kraju svakog kanala, u skretanjima na priključcima te u pravcu maksimalno svakih 50 m zbog minimalnog profila cijevi DN 250. Svi kanali su polagani u koridoru prometnica, neasfaltiranih putova te neobrađenih zemljišta.



Slika 6. Pregledna situacija sustava odvodnje i UPOV-a za naselja Rapavel, Anžići i Smolići [7].

Ukupna duljina gravitacijskih kolektora iznosi 4.075 m, tlačnih 310 m, broj revizijskih okana je 130, a kaskadnih 3. Sustav odvodnje karakteriziraju i kaskadna okna koja se ugrađuju s ciljem postizanja prekida padova usljed kojih će doći do pada energije toka otpadne vode i polaganja kanala s manjim uzdužnim padovima, a time i smanjenja brzine toka vode. Uz kaskadna okna, u sustavu su interpolirane i dvije crpne stanice na području naselja Smolići.

4.3. Problematika projektiranja i korištenja sustava odvodnje otpadnih voda malih naselja

Nakon definiranja obima mreže, prvi korak u projektiranju sustava odvodnje je odrediti mjerodavne protoke otpadne vode za što je neophodno pretpostaviti broj stanovnika koji će biti priključen na mrežu na kraju projektnog razdoblja. Budući da često nema dostupnih podataka o godišnjem prirastu stanovništva čak niti iz prostornih planova, potrebno je broj prognoziranih stanovnika odrediti koristeći različite metodologije. U radovima [6] i [7] korišten je pristup analize pozitivnog prirasta broja stanovnika kroz zadnjih 10 godina (između dva popisa stanovništva) za naselje Lobarika, dok je za naselja Rapavel, Anžići i Smolići taj prirast prema popisima stanovništva negativan te je u tom slučaju porast broja stanovnika procijenjen uzевši u obzir trend razvoja ruralnih prostora na području Istarske županije (uslijed mnogobrojnih financijskih poticaja za ruralni razvoj) i proširenja građevinskog područja.

Kod projektiranja razdjelnog sustava odvodnje otpadnih voda za mala naselja najveći problem predstavlja ograničenje minimalnih profila cijevi koje iznosi DN 250. Izradom oba projektna rješenja za odvodnju sanitarnih otpadnih voda naselja dobiveni su mali protoci te je profil cijevi s DN 250 na većem dijelu mreže predimenzioniran. Zbog malih potoka i ograničenja minimalnih profila cijevi, brzine tečenja su vrlo male.

S druge strane, pri definiranju pada nivelete (visinsko-vertikalno vođenje trase) pokušava se u što većoj mjeri pratiti pad terena kako bi se racionalizirali troškovi iskopa. Međutim, hidrauličkim proračunom dobivaju se neprihvatljivo male brzine pa nije moguće niveletom pratiti liniju terena, nego se niveletu postavlja na način da se zadovolji minimalna brzina u cijevima od 0,5 m/s, poštuju ograničenja dubine ugradnje cijevi i ograničenja uzdužnih padova. Minimalna dubina ugradnje cijevi mjereno od tjemena cijevi iznosi 1 m, a maksimalna dubina ugradnje 6 m. Kako bi se zadovoljila sva nabrojana ograničenja, dubine polaganja cijevi se znatno povećavaju.

Održavanje sustava odvodnje ima vrlo važnu ulogu u njezinom pravilnom funkcioniranju pogotovo u ovakvim projektnim rješenjima gdje su protoci mali i gdje se dobivaju minimalne brzine tečenja te je velika mogućnost pojave taloženja i začepjenja pa je potrebno planirati redovito ispiranje mreže na kritičnim dionicama.

5. Zaključak

U ovom radu prikazana je problematika zaštite krških izvorišta vode za piće u Istarskoj županiji izgradnjom sustava odvodnje i UPOV-a za mala naselja ruralnog karaktera koja se nalaze u zonama sanitarne zaštite.

Konkretna problematika detaljnije je prikazana na projektnim rješenjima sustava odvodnje naselja Loborika i naselja Rapavel, Anžići i Smolići u Istarskoj županiji. Izgradnjom sustava odvodnje i UPOV-a omogućuje se kontrolirana odvodnja, pročišćavanje i ispuštanje pročišćenih otpadnih voda u okoliš, zaštita okoliša i izvorišta vode za piće te se podiže i kvaliteta života stanovništva.

Temeljem analize projektnih rješenja može se zaključiti da je pri projektiranju sustava odvodnje sanitarnih otpadnih voda aglomeracija manjih od 2.000 ES izuzetno teško zadovoljiti ograničenja projektnih parametara kanalizacijske mreže (ograničenja minimalnih profila, ograničenja profila, ograničenja uzdužnih padova, ograničenja dubine ugradnje kanala) te da oni često znatno povećavaju ukupne troškove izgradnje, pogona i održavanja cjelovitih sustava. Zbog povećanih količina iskopa povećavaju se troškovi izgradnje sustava odvodnje, ali se povećavaju i troškovi održavanja jer treba provoditi učestalija ispiranja kanalske mreže. No, s obzirom da se njima provodi zaštita izuzetno važnog resursa, a to je voda za piće, ekonomska opravdanost u ovom slučaju nije prioritet.

Zahvala. *Ovaj je članak rezultat rada u okviru potpore Sveučilišta u Rijeci (naslov: Razvoj novih metodologija u gospodarenju vodama i tlom u krškim, osjetljivim i zaštićenim područjima; broj potpore 13.05.1.3.08).*

Literatura

- [1] Zakon o vodama (NN 153/09, 130/11, 53/13, 14/14)
- [2] Pravilnik o utvrđivanju zona sanitarne zaštite izvorišta (NN 66/11,47/13)
- [3] Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda (NN 80/13, 43/14, 27/15 i 3/16)
- [4] Odluka o određivanju osjetljivih područja (NN 81/10 i 141/15)
- [5] Direktiva o odvodnji i pročišćavanju komunalnih otpadnih voda (91/271/EEC)
- [6] Kablar, G. *Odvodnja sanitarnih otpadnih voda naselja Loborika*, Diplomski rad, Građevinski fakultet u Rijeci, 2017.
- [7] Fabić, M. *Odvodnja i pročišćavanje sanitarnih otpadnih voda naselja Rapavel, Anežići i Smolići*, Diplomski rad, Građevinski fakultet u Rijeci, 2017.

- [8] Requirements of the Urban Waste Water Treatment Directive and the Water Framework Directive Ways towards an Integrated Implementation in an Accession State Example Republic of Croatia. First Report. 2008.
- [9] Popović, I. *Implementation of the Water Framework Directive and Urban Waste Water Treatment Directive in the Republic of Croatia - Costs – Investments, Operation/Maintenance Adaptation*. Hrvatske vode. URL: <http://www.wfd-croatia.eu/templates/radnaEng.asp?sifraStranica=564#urban>, (pristupljeno 14.12.2017.)
- [10] Županijska razvojna strategija Istarske županije 2011.-2013., Službene novine Istarske županije 10/2011.
- [11] Odluka o zonama sanitarne zaštite izvorišta vode za piće u Istarskoj županiji, Službene novine Istarske županije 12/2005.
- [12] Odluka o izmjeni i dopuni Odluke o zonama sanitarne zaštite izvorišta vode za piće u Istarskoj županiji, Službene novine Istarske županije 2/2011.
- [13] „Organizacija, izgradnja i održavanje sustava odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda za mala naselja u obuhvatu vodozaštitnih područja u Istarskoj županiji“, Studija, naručitelj: Istarska županija, izradio: TEH-PROJEKT HIDRO d.o.o., Rijeka, 2000.
- [14] <http://www.ivsustav.hr/> (pristupljeno 14.12.2017.)
- [15] Izvješće o stanju u prostoru Istarske županije 2007-2012, Zavod za prostorno planiranje Istarske Županije, Pula, 2013.
- [16] Izvješće o stanju u prostoru Istarske županije 2013-2016, Zavod za prostorno planiranje Istarske Županije, Pula (radna verzija)
- [17] https://www.istra-istria.hr/fileadmin/dokumenti/prostorni_plan/Ostali/PPIZ_2016/PPIZ_2016S/2_3_2_odvodnja_otpadnih_voda_i_sustav_gospodarenja_otpadom_2016S.pdf (pristupljeno 14.12.2017.)

EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE LOKALNIH I LINIJSKIH KOEFICIJENATA GUBITAKA U CIJEVNOM SUSTAVU POD TLAKOM

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FRICTION AND RESISTENCE COEFFICIENTS IN PIPE SYSTEM UNDER PRESSURE

Anel Karabegović*, Elvis Žic*, Ignacijo Biluš, Aljaž Škerlavaj*****

Sažetak

U radu je provedeno eksperimentalno određivanje linijskih i lokalnih gubitaka, odnosno koeficijenta linijskih i lokalnih gubitaka na nekoliko karakterističnih fazonskih komada unutar cijevnog sustava pod tlakom. U svrhu izračuna navedenih koeficijenta, dane su mjerodavne formulacije za njihovo određivanje. U sklopu rada na fizikalnom modelu GUNT HM 150 u sklopu Praktikuma hidrotehničkog laboratorija Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, provedena su tri osnovna eksperimentalna mjerenja: proračun određivanja lokalnih gubitaka na cijevnom koljenu (pod kutom od 45° i 90°), hidraulička analiza uslijed promjene poprečnog presjeka cijevi (postepeno suženje i proširenje cijevi) te hidraulička analiza uslijed grananja cijevne dionice (račvasti dio cijevnog sustava). Na kraju rada dani su zaključci koji proizlaze iz provedenih eksperimentalnih pokusa, kao i smjernice za buduća dodatna ispitivanja lokalnih i linijskih gubitaka na danom fizikalnom modelu.

Ključne riječi: *sustav pod tlakom, lokalni i linijski gubici, lokalni i linijski koeficijenti gubitaka, fizikalni model, hidraulička analiza, turbulentni i laminarni režim tečenja*

Abstract

In this paper experimental investigation of major and minor hydraulic losses, ie the friction and resistant coefficients was performed on several characteristic fittings

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: anel.karabegovic@student.uniri.hr; elvis.zic@uniri.hr

** Institut za energetsko, procesno i okolišno inženjerstvo, Tehnički fakultet Sveučilišta u Mariboru, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, E-mail: ignacijo.bilus@um.si

*** Kolektor Turboinštitut d.o.o., Rovnsnikova 7, 1000 Ljubljana
E-mail: aljaz.skerlavaj@kolektor.com

within the pressurized pipe system. For the purpose of calculating these coefficients, relevant formulas have been given for their determination. Within the work on the physical model GUNT HM 150 as a part of the Practicum Hydro-technical laboratory of the Faculty of Civil Engineering in Rijeka, three basic experimental measurements were conducted: calculation for defining minor hydraulic losses on the pipe joint (under an angle of 45° and 90°), hydraulic analysis from the changes of the cross section of the pipe (gradual narrowing and widening of the pipes), and hydraulic analysis from the branching of the pipe legs (branched part of the pipe system). At the end of the paper, conclusions were given based on the conducted experimental tests, as well as guidelines for future additional tests of minor and major hydraulic losses on the given physical model.

Key words: *system under pressure, minor and major hydraulic losses, friction and resistance coefficients, physical model, hydraulic analysis, turbulent and laminar flow regime*

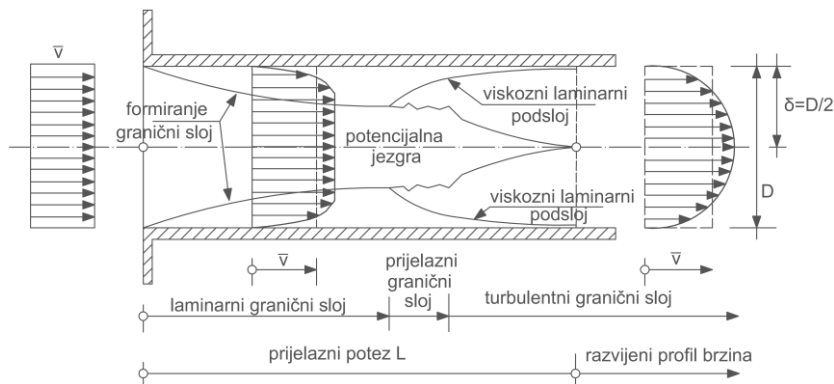
1. Uvodno

Jedan od izazova za građevinske inženjere je projektiranje sustava u kojem je tekućina u cijevi pod tlakom. Vodoopskrbni, plinski, sanitarni i oborinski kanalizacijski sustavi dio su važne infrastrukture u svakome gradu, a vrlo složeni sustavi nalaze se u elektranama, rafinerijama i drugim proizvodnim okruženjima. Izučavanje cijevnih sustava i gubitaka energije u njima od velike je praktične važnosti u mnogim područjima inženjerstva [1, 2]. Za razliku od idealne ili neviskozne tekućine ($\nu=0$), kod viskozne tekućine ($\nu\neq 0$) se javljaju otpori uslijed strujanja pa se mehanička energija stalno umanjuje uzduž toka, tj. disipira. Zbog toga se, naravno, povećava unutrašnja energija (toplinska energija), tako da je opći zakon održanja energije očuvan. Budući da je porast unutrašnje energije uslijed rada sila otpora ireverzibilan, slijedi da se pri strujanju viskozne tekućine entropija tog termodinamičkog sustava povećava [2]. Zbog povećanja unutarnje energije uslijed rada okoline na termodinamičkom sustavu, treba proučiti interakciju mehaničkog sustava s okolinom, to jest za određivanje veličine disipacije mehaničke energije treba proučiti prirodu otpora u strujanju

2. Hidrodinamički otpori u cijevi

Postoji sličnost između razvoja graničnog sloja na ravnoj ploči i razvoja graničnog sloja u cijevima kružnog poprečnog presjeka. Granični sloj se počinje razvijati uz stjenku od početka cijevi promjera D (Slika 1.). Područje neporemećenog toka (potencijalna jezgra) postaje sve manje. Na udaljenosti L od početka cijevi granični sloj je u potpunosti razvijen s debljinom $\delta = D/2$. Režim daljnjeg strujanja u cijevi određen je vrstom graničnog sloja u trenutku spajanja, tj. strujanje može biti laminarno,

prijelazno ili turbulentno [2, 3, 4]. Dužina prijelaznog područja L , ovisna o Reynoldsovom broju $Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$, nije stabilna jer ovisi o intenzitetu turbulencije u dolaznom toku.



Slika 1. Razvoj graničnog sloja u cijevima [2]

Mjerenja Kristena [2] pokazuju da se u turbulentnom strujanju dužina prijelaza kreće od 50 do $100D$, dok se prema mjerenjima Nikuradzea [2, 6] ona kreće od 25 do $40D$ (cijevi umjetno ohrapavljene zrcima pijeska). Uspoređujući Darcy-Weisbachov izraz za gradijent linije energije J_e i gradijent piezometarske linije J prema Hagen-Poiseuilleovom zakonu [4] ($J_e = J$):

$$\frac{\lambda \bar{v}^2}{D 2g} = \frac{32\nu}{gD^2} \bar{v} \quad (1)$$

dobije se vrijednost koeficijenta otpora tečenju u laminarnom strujanju $\lambda = \frac{64}{Re}$, gdje je Reynoldsov broj određen preko izraza $Re = \frac{\bar{v}D}{\nu}$. Oznaka ν predstavlja kinematičku viskoznost tekućine, dok je \bar{v} srednja profilska brzina i g ubrzanje sile teže. Unutar turbulentnog graničnog sloja postoji turbulentna jezgra u kojoj sile inercije turbulentnih virova nadvladavaju sile viskoznosti. Posmična naprezanja, tj. sile trenja opisane su koeficijentom turbulentne (prividne) viskoznosti.

Važnu ulogu pri formiranju graničnih slojeva igra hrapavost stjenke po kojoj tekućina struji. Prirodna hrapavost razlikuje se od jednolike zrnate, no može se razmatrati ekvivalentna hidraulička hrapavost (označava se s k ili ε) koja će dati iste otpore kao i jednolika zrnata hrapavost [4, 5]. Dio tekućine između zrnaca hrapavosti praktično miruje, dok glavina toka "klizi" iznad tako formiranog sloja. U turbulentnom graničnom sloju fizikalna hrapavost može biti takva da je k manji od debljine viskoznog podsloja, koji se glede miješanja tekućine ponaša kao laminarni sloj. Tada

kažemo da je to hidrodinamički glatka površina koja se pri turbulentno glatkom strujanju u cijevima pod tlakom opisuje Prandtlovim zakonom [2]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log(Re\sqrt{\lambda}) - 0,8 \quad (2)$$

Kada je veličina fizikalne hrapavosti takva da je veća ili jednaka debljini viskoznog podsloja, turbulentni virovi/vrtlozi se tada stvaraju na visini zrnaca hrapavosti. Sile otpora ovise o dominantnom utjecaju turbulentnog trenja, a sile viskoznosti su praktički zanemarive, tj. veličina otpora ovisi isključivo o veličini relativne hrapavosti k/D . Turbulentno hrapavo strujanje se aproksimira Prandtl-Karmanovim izrazom [2]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 - 2 \log \frac{k}{D}. \quad (3)$$

Između ovih ekstremnih slučajeva postoji prijelazno područje koje se zove turbulentno prijelazno strujanje i ovisi o Reynoldsovom broju Re i o relativnoj hrapavosti k/D . Prvi dijagram koji je obuhvaćao sve zakonitosti otpora strujanja u cijevima izradio je Nikuradze [4]. Sintezu Nikuradzeovih pokusa i mjerenja otpora strujanju u tehničkim cijevima izveli su Colebrook-White obradom turbulentno prijelaznog područja, a izraz glasi [4]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 - 2 \log \left(\frac{k}{D} + \frac{9,35}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (4)$$

Eksplicitnu formulu izračunavanja koeficijenta otpora tečenju izradio je Moody s točnošću $\pm 5\%$ u odnosu na Colebrook-Whiteovu formulu [4]:

$$\lambda = 0.055 \left[1 + \left(20000 \frac{k}{D} + \frac{10^6}{Re} \right) \right] \quad (5)$$

koja vrijedi u rasponu Reynoldsovih brojeva i relativne hrapavosti $4 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^7$, $\frac{k}{D} \leq 0.01$. Rezultati svih istraživanja danas se prikazuju u obliku Moodyjevog dijagrama koji je konstruiran na osnovi Colebrook-Whiteove formule za turbulentno i Hagen-Poiseuilleovog zakona za laminarno strujanje u cijevima.

3. Proračun strujanja u cjevovodima

Dinamička jednadžba za strujanje realne tekućine u cijevima može se integrirati između dviju točaka na osi strujanja (Slika 2.):

$$\int_1^2 \frac{d}{dl} \left(z + \frac{p}{\rho g} + \alpha \frac{v^2}{2g} \right) dl + \int_1^2 \frac{\lambda}{D} \frac{v^2}{2g} dl = 0 \quad (6)$$

gdje je srednja profilska brzina $v = Q/A$ napisana bez oznake osrednjenja, dok je α Coriolisov koeficijent ili koeficijent kinetičke energije. Nakon integracije prvog integrala i sređivanja dobije se:

$$\left(z + \frac{p}{\rho g} + \alpha \frac{v^2}{2g}\right)_1 = \left(z + \frac{p}{\rho g} + \alpha \frac{v^2}{2g}\right)_2 + \int_1^2 \frac{\lambda}{D} \frac{v^2}{2g} dl \quad (7)$$

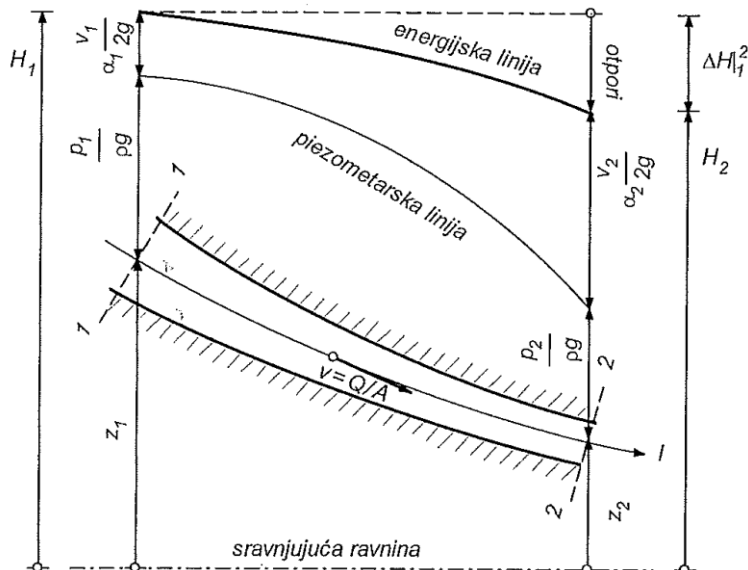
Naznačeni integral u jednadžbi (7) je ukupni gubitak energetske visine na promatranom potezu:

$$\Delta H|_1^2 = \int_1^2 \frac{\lambda}{D} \frac{v^2}{2g} dl \quad (8)$$

tako da se jednadžba (7) može pisati u sljedećem obliku:

$$\left(z + \frac{p}{\rho g} + \alpha \frac{v^2}{2g}\right)_1 = \left(z + \frac{p}{\rho g} + \alpha \frac{v^2}{2g}\right)_2 + \Delta H|_1^2 \quad (9)$$

Ova jednadžba predstavlja Bernoullijevu jednadžbu za realnu tekućinu u stacionarnom režimu tečenja. Izraz (9) je prikladan za prikazivanje energijskih odnosa uzduž realnog strujanja (Slika 2).



Slika 2. Energijski odnosi u realnom strujanju uzduž cijevi [2]

Otpori trenja u cijevima nazivaju se linijskim gubitcima, dok se ostali na spojevima cijevnih poteza i ostalim fazonskim komadima nazivaju lokalnim

gubitcima. Linijski gubitak na cijevi dužine L konstantnog promjera D određuje se padom energijske visine prema (8):

$$\Delta H_{tr} = \int_1^2 \frac{\lambda}{D} \frac{v^2}{2g} dl = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = \xi_{tr} \frac{v^2}{2g} \quad (10)$$

gdje je $\xi_{tr} = \lambda L/D$ koeficijent linijskog gubitka energije. Slično tome, ako se između dviju točaka strujanja javlja lokalni otpor bilo koje vrste, može se pisati energijski odnos u obliku:

$$\left(z + \frac{p}{\rho g} + \alpha \frac{v^2}{2g} \right)_1 = \left(z + \frac{p}{\rho g} + \alpha \frac{v^2}{2g} \right)_2 + \Delta H_{lok} \quad (11)$$

Lokalni gubitak energijske visine ΔH_{lok} je pritom jednak:

$$\Delta H_{lok} = \xi_{lok} \frac{v_{ref}^2}{2g} \quad (12)$$

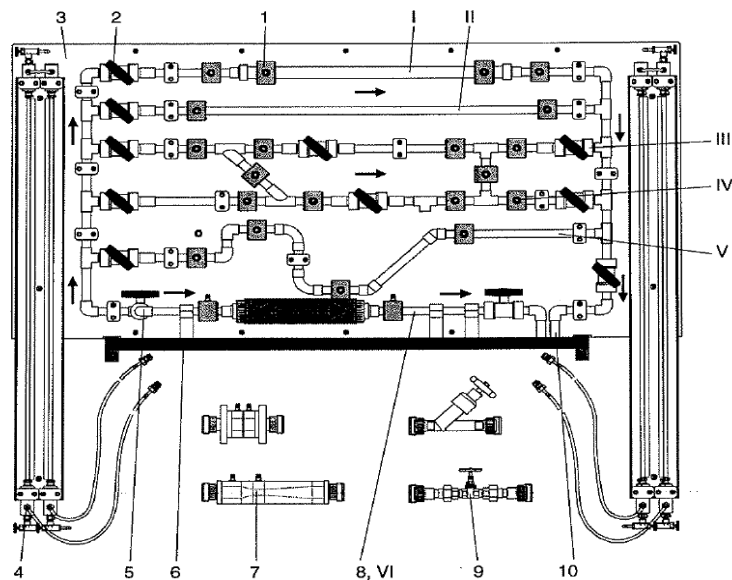
pri čemu je v_{ref} mjerodavna brzina lokalnog gubitka, a ξ_{lok} lokalni koeficijent gubitaka.

4. Fizikalni model HM 150.11

Eksperimentalna analiza u danom radu provedena je pomoću fizikalnog modela HM 150.11. Na samom modelu mogu se vršiti eksperimenti u kojima se mjeri protok, tlak, određivanje linijskih i lokalnih gubitaka te njihovih koeficijenata gubitaka u sustavu. Cjelokupna jedinica fizikalnog modela se sastoji od kvadratnog cjevastog čeličnog okvira sa plastificiranim stražnjim zidom [7]. Na stražnjem se zidu nalazi cijevni sustav montiran pomoću fazonskih komada na kojima se može ručno vršiti dovod i zatvaranje dovoda vode pomoću ventila (Slika 3 i 4). Stražnji zid također ima dva manometra pričvršćena pomoću zvjezdastih matica. Razni mjerni instrumenti mogu biti smješteni u podesivim dijelovima mjerne sekcije. Voda se dovodi bilo putem HM 150 Basic Hydraulics Bench uređaja ili putem razvodnih priključaka vode u laboratoriju. HM 150 jedinica omogućava proračun s konstantnom zatvorenom cirkulacijom vode (stacionarno tečenje pri određenom stupnju otvorenosti glavnog ventila).

Diferencijalni tlakomjer je pogodan za mjerenje razlike tlakova između dvije mjerne točke (presjeka) te apsolutnog tlaka u mm vodenog stupca [8]. Mjerno područje je od 0 do 1000 mm stupca vode. Mjerač se sastoji od dvoslojnog stakla s podlogom od metalne milimetarske skale. Dvije cijevi su povezane na vrhu i imaju zajednički odzračni ventil. Razlika tlaka se mjeri sa zatvorenim ventilom, a apsolutni tlak se mjeri s otvorenim ventilom.

Mjerne točke su povezane na donjem kraju cijevi pomoću spojke s brzim djelovanjem i vrlo jednostavnim automatskim zatvaranjem (ili otvaranjem). Odvodni ventil se nalazi na dnu svake cijevi.



Slika 3. Mjerni odjeljci (sekcije) na fizikalnom modelu HM 150.11 [7]

- I - cijevni odjeljak (sekcija) s diskontinuiranim proširenjem 20 x 1,5 do 32 x 1,8 mm, te diskontinuiranim suženjem 32 x 1,8 do 20 x 1,5 mm (PVC)
- II - ravni odjeljak cijevi, izmjerena duljina 800 mm, 20 x 1,5 mm (PVC)
- III/IV - cijevni odjeljak sa 2 x Y komadom od 45°, 2 x T komadom 20 x 1,5 mm (PVC), V - odjeljak cijevi s fazonskim komadom pod kutom od 2 x 90°, savijenim fazonskim komadom 2 x 90°, fazonskim komadom pod kutom od 2 x 45°, 20 x 1,5 mm (PVC), VI - podesivi mjerni dio za ugradnju raznih mjernih uređaja, 20 x 1,5 mm (PVC), 1 - prstenasta komora s mogućnošću mjerenja tlaka pomoću cijevnog priključka, 2 - kuglični ventil za isključenje dijelova sekcija, 3 - stražnji zid, 4 - diferencijalni tlakomjer, 5 - ulaz, dotok vode (skriveni), 6 - cjevasti čelični okvir s usisnim jastučićima, 7 - mjerni uređaji - mjerenje protoka, 8 - podesivi odjeljak za mjerenje, 9 - mjerni uređaji - zaporni uređaji, 10 - ispušni ventil

Pozicijsko testiranje na HM150 Basic Hydraulics Bench fizikalnom modelu postiže se pomoću opskrbe vodom iz donjeg spremnika (kontinuiranim ili varijabilnim protokom uz reguliranje pomoću kuglastog ventila). Prilikom postavljanja fizikalnog modela na nultu poziciju (nulto očitavanje), za postizanje maksimalnog mogućeg raspona nulti položaj mjeraca tlaka treba biti u središtu ljestvice. Potrebno je zatvoriti cijevne odvode. Protok je na centru skale jednak nuli te vrijedi ista razina u obje mjerne cijevi. Potrebno je pažljivo postaviti razinu na centru skale pomoću

odzračnog ventila [8]. Pri prvom izvođenju mjerenja potrebno je podesiti željeni protok putem dovodnog ventila te očitati diferencijalni tlak kao razliku visina između dva stupca vode. U nastavku treba procijeniti srednju vrijednost ukoliko se očitavanje mijenja. Po završetku mjerenja isključuje se pumpa na HM 150 radnoj jedinici.



Slika 4. Mjerenja na fizikalnom modelu HM 150.11 (Foto: A. Karabegović)

5. Izvedeni eksperimenti na fizikalnom modelu HM 150.11

5.1. Eksperiment 1: Protok kroz cijevi s trenjem

U ovom eksperimentu, gubitak tlaka p_v i linijski gubitak ΔH_{tr} . za ispitivanu cijev promjera D s trenjem su određeni eksperimentalno. Kod turbulentnog stacionarnog strujanja u cijevima kod Reynoldsovog broja Re iznad 2320, gubitak tlaka je proporcionalan dužini cijevi l , Darcy-Weisbachovom koeficijentu trenja cijevi λ , gustoći tekućine koja teče kroz cijev ρ , te kvadratu brzine protoka v :

$$p_v = \frac{\lambda \cdot l}{2 \cdot D} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (13)$$

Odgovarajući linijski gubitak ΔH_{tr} . se određuje preko izraza:

$$\Delta H_{tr} = \frac{\lambda \cdot l}{D} \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (14)$$

Za turbulentni protok kroz cijev, koeficijent trenja λ ovisi o visini apsolutne hrapavosti $k(\epsilon)$ i o Reynoldsovom broju Re . U ovom slučaju, vrijednost koeficijenta kinematičke viskoznosti za vodu iznosi $\nu = 0.935 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ koja odgovara temperaturi vode od 23°C (sobna temperatura rada na fizikalnom modelu). Brzina v se određuje pomoću volumenskog protoka \dot{V} ($dV/dt = Q$) i površine poprečnog presjeka, tj. promjera cijevi

D prema izrazu $v = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot D^2}$. Za hidraulički glatke cijevi kod kojih vrijedi $Re < 65 \frac{D}{k}$, ($2320 < Re < 105000$) linijski se koeficijent gubitaka (koeficijent trenja) računa uz pomoć Blasiusove formule:

$$\lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (15)$$

Za režim strujanja u cijevima u prijelaznom području za hrapave cijevi vrijedi $65 \frac{D}{k} < Re < 1300 \frac{D}{k}$, pa se koeficijent trenja računa prema Colebrookovoj implicitnoj jednadžbi [7]:

$$\lambda = \left[2 \log \left(\frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{0.27}{D/k} \right) \right]^{-2} \quad (16)$$

5.1.1. Izvođenje mjernog eksperimenta 1

U ovom mjernom eksperimentu, istražuju se gubitci u cijevi u mjernoj sekciji II (Slika 3). Mjerni dio je dugačak $l = 800 \text{ mm}$. Radi se o PVC cijevi unutrašnjeg promjera $D = 17 \text{ mm}$ čija je visina apsolutne hrapavosti uzeta sa $k=0,001 \text{ mm}$. Kuglasti ventil se prije korištenja mjerne sekcije koristi za postavljanje određene visine na manometru i utvrđivanje relevantnog volumenskog protoka prema određenom linijskom gubitku. Dobiveni rezultati su prikazani u Tablici 1. Izmjerene gubitke je potrebno usporediti s vrijednostima koje se mogu dobiti računski (Tablica 2). Veliki postotak greške linijskog gubitka (33,3 %, Tablica 2) može se pripisati krivom očitavanju izmjenjenog linijskog gubitka (vizualna interpretacija mjeritelja).

Tablica 1. Utvrđivanje volumenskog protoka prema izmjenjenom linijskom gubitku

Linijski gubitak $\Delta H_{tr.}$, u mm	6	18	36	89	130	175	275
Volumenski protok \dot{V} , u l/min	4	7	10	15	20	24	30

Tablica 2. Usporedba izmjenjenog i izračunatog linijskog gubitka

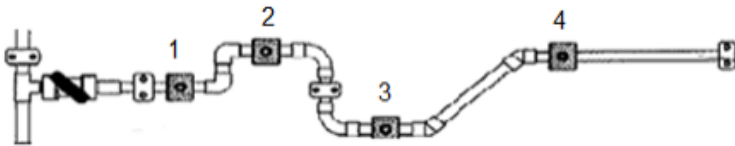
Linijski gubitak $\Delta H_{tr.}$, u m	0,006	0,018	0,036	0,089	0,130	0,175	0,275
Volumenski protok \dot{V} , u $10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	66,7	116,7	166,7	250	333,3	400	500
Brzina protoka v , u m/s	0,294	0,514	0,734	1,101	1,468	1,762	2,203
Reynoldsov broj Re	5345	9352	13360	20035	26711	32057	40071
Koeficijent trenja λ prema (15)	0,037	0,0322	0,0294	0,0266	0,0248	0,0237	0,0224
Izračunati linijski gubitak $\Delta H_{tr.}$ prema (14), m	0,008	0,0204	0,0380	0,0773	0,1282	0,1765	0,2607
Postotak pogreške, %	33,3	13,3	5,6	-13,1	-1,4	0,9	5,2

5.2. Mjerni eksperiment 2: Cijevno koljeno

Za cijevna zaobljena koljena u sustavima pod tlakom, koeficijent otpora ovisi o kutu devijacije protoka i omjera polumjera zakrivljenosti u koljenu te promjera cijevi. Osim toga, koeficijent otpora ovisi i o obliku koljena. Za ovaj poseban slučaj cijevnih koljena s kutom od 90° primijenjen je dijagram kako za glatke, tako i za hrapave cijevi [6, 8]. Za radijus koljena manji od promjera cijevi ($R/D < 1$) koeficijenti otpora za koljena su aproksimativno primjenjivi. Otpor protoka koljena s kutovima δ manjim od 90° može se izračunati uz linearnu proporcionalnost [7]:

$$\xi = \xi_{90^\circ} \frac{\delta}{90^\circ} \quad (17)$$

U ovom mjernom eksperimentu, cijevne komponente se ispituju u mjernom odjeljku V (Slika 3). Mjerni priključci se postavljaju u točke 1, 2, 3 i 4 (Slika 5, Tablica 3).



Slika 5. Mjerni odjeljak V [7]

Izmjerene vrijednosti se koriste za određivanje koeficijenata otpora za koljena (Tablica 4). Budući da nema promjene poprečnog presjeka, koristi se pojednostavljena formula za izračun koeficijenta otpora ξ :

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta H_{lok.total} \cdot g}{v^2} - \lambda \cdot \frac{l}{D} \quad (18)$$

U gornjoj formuli se koristi duljina cijevi između mjernih priključaka u odnosu na središnju liniju cijevi. Izraz $\Delta H_{lok.total}$ se odnosi na ukupni lokalni gubitak na cijevnim dionicama od karakterističnih točki 1-2, 2-3 i 3-4 te je na temelju te vrijednosti izračunat lokalni koeficijent gubitaka ξ_{uk} iz Tablice 4. Kako se na tim dionicama nalaze po dva fazonska komada istih karakteristika (vidi Sliku 5), koeficijent otpora ξ je uzet sa pola vrijednosti od koeficijenta ξ_{uk} .

Prilikom mjerenja diferencijalnim manometrom između točaka 1 i 3 izmjeren je gubitak $\Delta H_{lok.} = 621$ mm, što znači da je ukupni gubitak veći od zbroja gubitaka od 1 do 2 i od 2 do 3 (tj. $346 + 270 < 621$ mm). Koeficijent otpora dobiven ovim proračunom za pravokutno koljeno (koljeno kod kojeg su dolazna cijev prije koljena i odlazna cijev nakon koljena pod pravim kutom) prilično je niži od očekivanog prema vrijednostima iz literature [5]

kod kojih je za glatko koljeno dano $\xi = 1,13$. Koeficijent otpora za savijene cijevi je iznad vrijednosti u literaturi kod kojih je za $R/D = 2,35$ za glatke cijevi $\xi = 0,14$, a za hrapave cijevi $\xi = 0,28$. To znatno odstupanje možemo pripisati nečistom prijelazu između ravne i savijene cijevi te drugačijem materijalu cijevi. Kod koljena od 45° dobivena vrijednost približno odgovara vrijednosti iz literature [5].

Tablica 3. Izmjereni lokalni gubici

	Vrsta koljena		
	Pravokutno koljeno $\zeta = 90^\circ$, PVC 20x1.5 mm	Savijena cijev $\zeta = 90^\circ$ PVC 20x1.5 mm	Kutna cijev $\zeta = 45^\circ$, PVC 20x1.5 mm
Mjereni dionica	1-2	2-3	3-4
Volumenski protok \dot{V} u l/min.	27,3	27,3	27,3
Lokalni gubitak $\Delta H_{lok.}$ u mm	346	270	320

Tablica 4. Izračunati koeficijenti otpora cijevnih koljena

	Vrsta koljena		
	Pravokutno koljeno $\zeta = 90^\circ$ PVC 20x1,5 mm	Savijena cijev $\zeta = 90^\circ$ PVC 20x1,5 mm	Kutna cijev $\zeta = 45^\circ$ PVC 20x1,5 mm
Unutrašnji promjer D u mm	17	17	17
Duljina cijevi l u mm	203	322	247
Volumenski protok \dot{V} u $10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	455	455	455
Brzina protoka v u m/s	2,005	2,005	2,005
Reynoldsov broj Re [/]	33865	33865	33865
Omjer D/k [/]	17000	17000	17000
Koeficijent trenja λ prema Blasiusu, izraz (15) [/]	0,0233	0,0233	0,0233
Lokalni gubitak $\Delta H_{lok.total.}$ u m	0,346	0,270	0,320
Koeficijent otpora ξ_{uk} [/]	1,42	1,05	1,29
Koeficijent otpora ξ [/]	0,71	0,52	0,65

5.3. Mjerni eksperiment 3: Promjena poprečnog presjeka cijevi

Promjene u poprečnom presjeku cijevi (cijevni segment I, Slika 3), dostupne kroz ispitivanje na ovom eksperimentalnom fizikalnom modelu, imaju mogućnost praćenja promjena u obliku naglog širenja ili naglog suženja (kontrakcije) poprečnog presjeka cijevi. Za nagle promjene poprečnog presjeka cijevi, vrijednosti lokalnih koeficijenata gubitaka

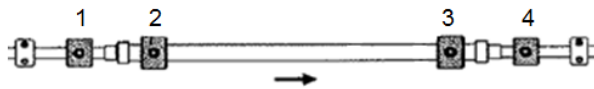
energije mogu se preuzeti iz raznih publikacija ili se mogu izvesti direktno iz Bernoullijeve jednadžbe [8]. Za naglo proširenje cijevi vrijedi [2, 4]:

$$\xi_{n.proš} = \left(\frac{A_1}{A_2} - 1 \right)^2 = \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2} \right)^2 \quad (19)$$

odnosno, za naglo suženje vrijedi aproksimativna formulacija prema [4]:

$$\xi_{n.suž} = 0,5 * (1 - a^2) - 0,13 * [\sin\pi * (1 - a^2)]^{0,8} \quad (20)$$

pri čemu je $a=A_1/A_2$. U izrazu (19), fizikalna veličina A_2 definira površinu poprečnog presjeka nakon proširenja (promjer D_2), a A_1 površinu poprečnog presjeka prije proširenja (promjer D_1). Kod izraza (20), fizikalna veličina A_2 definira površinu poprečnog presjeka prije suženja (promjer D_2), a A_0 površinu poprečnog presjeka nakon suženja (promjer D_0 , $D_0 = D_1$). U ovom ispitivanju kroz mjerni eksperiment, otpori pri promjeni poprečnog presjeka cijevi se istražuju u mjernom odjeljku I (Slika 3 i Slika 6).



Slika 6. Mjerni odjeljak I [7]

Prilikom mjerenja koeficijenta otpora za proširenje cijevi, diferencijalni tlakomjer se priključuje na mjerne točke 1 i 2, a za suženje cijevi na mjerne točke 3 i 4. (Slika 6). Rezultati se dobivaju kao razlika očitavanja tlaka na diferencijalnom tlakomjeru za proširenje i suženje cijevi (Tablica 5). Oba su mjerenja izvršena na cijevi duljine 125 mm koja ima manji unutrašnji promjer $D_1 = 17$ mm ($v_1 = 2,05$ m/s), a veći $D_2 = 28,4$ mm ($v_2 = 0,73$ m/s). Volumenski protok je pritom iznosio $\dot{V} = 27,9$ l/min. [8]. Lokalni gubitak za proširenje cijevi iznosi $\Delta H_{lok.1-2} = 492 - 557 = -65$ mm, dok je kod suženja cijevi on jednak $\Delta H_{lok.3-4} = 644 - 395 = 249$ mm.

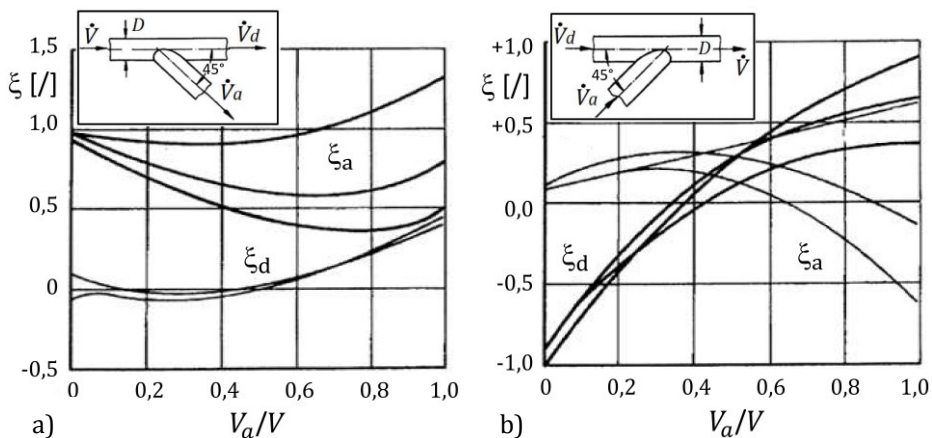
Tablica 5. Izmjereni i izračunati koeficijenti lokalnih gubitaka

Vrsta fazonskog komada	Naglo proširenje ($A_1 \rightarrow A_2$)	Naglo suženje ($A_2 \rightarrow A_0 = A_1$)
Mjerna dionica (Slika 6)	1-2	3-4
Volumenski protok \dot{V} u l/min.	27,9	27,9
Izmjereni lokalni gubitak $\Delta H_{lok.}$ u mm	-65	249
Izračunati lokalni koeficijenti gubitaka prema (19) i (20)	$\xi_{n.proš} = 0,41$	$\xi_{n.suž} = 0,31$
Izračunati lokalni koeficijenti gubitaka iz literature (prema [4])	$\xi_{n.proš} = 0,16$	$\xi_{n.suž} = 0,21$

Zanimljivo je da za slučaj proširenja nema gubitka tlaka, nego se zapravo događa povišenje tlaka. Porast tlaka uzrokovan gubitkom brzine veći je od pada tlaka uzrokovanog trenjem u cijevi. Na temelju vrijednosti omjera poprečnih profila na fizikalnom modelu $A_1/A_2 = 0,6$ određene su prema literaturi [4] vrijednosti lokalnih koeficijenata gubitaka za naglo proširenje ($\xi_{n.proš} = 0,16$), odnosno za naglo suženje ($\xi_{n.suž} = 0,21$) (Tablica 5).

5.4. Mjerni eksperiment 4: grananje cijevi (račve)

Prilikom razdvajanja toka unutar cijevnog sustava pod tlakom ili spajanja dva pojedinačna toka, značajan pad tlaka se pojavljuje na odvoju (račvi) zbog promjene smjera i razdvajanja strujnica. Gubici strujanja koji se javljaju ovise o geometriji račve i veličini volumenskog protoka. Radi zadovoljavanja jednadžbe kontinuiteta, ukupni volumenski protok \dot{V} je jednak zbroju izlaznih (ili ulaznih) volumenskih protoka \dot{V}_a i \dot{V}_d ($\dot{V} = \dot{V}_a + \dot{V}_d$). Slika 7 predstavlja razdvajanje toka te je u pripadajućem dijagramu prikazana ovisnost koeficijenta otpora o omjeru volumena \dot{V}_a/\dot{V} .



Slika 7. Lokalni koeficijenti gubitka pri a) razdvajanju i b) spajanju toka [8]

Iz dijagrama je vidljivo da kod većih vrijednosti omjera volumena \dot{V}_a/\dot{V} dolazi do porasta vrijednosti lokalnih koeficijenata gubitaka u gornjoj cijevi ξ_d , dok se u kosoj odlaznoj cijevi koeficijenti lokalnih gubitaka ξ_a za manje vrijednosti omjera volumena \dot{V}_a/\dot{V} smanjuju do omjera 0,4, odnosno 0,6, da bi nakon toga značajno rasli do omjera vrijednosti 1 (Slika 7a)).

Slika 7b predstavlja spajanje tokova te je u pripadajućem dijagramu prikazana ovisnost koeficijenta otpora o omjeru volumena \dot{V}_a/\dot{V} . Iz dijagrama je jasno vidljivo da kod većih vrijednosti omjera volumena \dot{V}_a/\dot{V} dolazi do značajnog porasta vrijednosti lokalnih koeficijenata gubitaka u gornjoj cijevi ξ_d , dok se u dolaznoj kosoj cijevi koeficijenti lokalnih gubitaka

povećavaju do vrijednosti omjera volumena $\dot{V}_a/\dot{V} = 0.3$ da bi se nakon tog omjera značajnije smanjivali do omjera vrijednosti 1.

Za jednako razdvajanje toka u T fazonskom komadu, koeficijent otpora ζ_T može se izračunati s pojednostavljenom formulom pomoću lokalnog gubitka $\Delta H_{lok.uk.}$:

$$\xi_T = \frac{2 \cdot \Delta H_{lok.uk.} \cdot g}{v^2} - \lambda \cdot \frac{l}{D} \quad (21)$$

U ovom mjernom eksperimentu, račve i T fazonski komadi su ispitivani u mjernim odjeljcima III i IV (Slika 3). Željene vrste protoka (odvajanje ili grananje) mjere se pomoću uzvodno ili nizvodno postavljenog kuglastog ventila. Gubici na protoku povezani su s kinetičkom energijom ukupnog protoka. Koristi se duljina cijevi između mjernih priključaka u odnosu na središnju liniju cijevi. Mjerenje je izvršeno za Y komad unutrašnjih promjera cijevi $D_1 = 17$ mm, na duljini od $l = 150$ mm, za razdvajanje i za spajanje tokova. Rezultati za Y komad su prikazani u Tablici 6. Također je mjerenje obavljeno i za T komad (isti promjer i duljina kao Y komad), za razdvajanje i za spajanje tokova, a rezultati su prikazani u Tablici 7. U potonjem slučaju, linijski koeficijent gubitka λ je izračunat prema formuli (15) kako bi se lokalni koeficijenti gubitaka energije mogli usporediti prema izrazu (21).

Tablica 6. Izračun lokalnih koeficijenata gubitaka za Y fazonski komad

IZMJERENO	Razdvajanje tokova			Spajanje tokova		
	Volumenski protok \dot{V} u l/min	Lokalni gubitak $\Delta H_{lok.}$ u mm		Volumenski protok \dot{V} u l/min	Lokalni gubitak $\Delta H_{lok.}$ u mm	
	32,4	$\Delta H_{lok,a}$ 50	$\Delta H_{lok,d}$ -120	30,0	$\Delta H_{lok,a}$ 130	$\Delta H_{lok,d}$ -190
IZRAČUNATO	Brzina toka v , m/s	2,38	2,38	Brzina toka v , m/s	2,20	2,20
	Lokalni koeficijenti gubitaka	$\xi_a = 0,17$	$\xi_d = 0,42$		$\xi_a = 0,53$	$\xi_d = 0,77$
	Lokalni koeficijent gubitaka prema sl. 7.	$\xi_a = 0,45$	$\xi_d = 0,10$		$\xi_a = 0,42$	$\xi_d = 0,35$

Rezultati prikazani u Tablicama 6 i 7 ukazuju na značajne razlike u gubicima s obzirom na Y i T fazonski komad. Nastale razlike su uzrokovane skretanjem pod pravim kutom kod T komada, što utječe na veličinu i raspored gubitaka u cijevima. Također, mjerenje protoka je vršeno volumetrijski (punjenjem pridnenog bazena kroz određeno vrijeme), pa se nisu mogli precizno pogoditi protoci kod razdvajanja i spajanja tokova.

Tablica 7. Izračun lokalnih koeficijenata gubitaka za T fazonski komad

IZMJERENO	Razdvajanje tokova			Spajanje tokova		
	Volumenski protok \dot{V} u l/min	Lokalni gubitak $\Delta H_{lok.T}$ u mm		Volumenski protok \dot{V} u l/min	Lokalni gubitak $\Delta H_{lok.T}$ u mm	
	30,0	$\Delta H_{lok, Ta}$ 125	$\Delta H_{lok, Td}$ -180	29,3	$\Delta H_{lok, Ta}$ 20	$\Delta H_{lok, Td}$ 30
IZRAČUNATO	Brzina toka v , m/s	2,20	2,20	Brzina toka v , m/s	2,15	2,15
	Lokalni koeficijenti gubitaka	ξ_{Ta} = 0,51	ξ_{Td} = 0,73		ξ_{Ta} = 0,09	ξ_{Td} = 0,13
	Lokalni koeficijent gubitaka prema (21)	ξ_{Ta} = 0,31	ξ_{Td} = 0,53		ξ_{Ta} = 0,11	ξ_{Td} = 0,19

6. Zaključak

U ovom radu opisano je određivanje linijskih i lokalnih gubitaka u cijevnom sustavu pod tlakom pomoću fizikalnog modela HM 150.11. Mjerenja su vršena u hidrotehničkom praktikumu Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci. U sklopu rada provedeni su slijedeći eksperimenti: određivanje protoka kroz sustav cijevi s trenjem, proračun zaobljenog cijevnog koljena, hidraulička analiza uslijed promjene poprečnog presjeka cijevi te hidraulička analiza uslijed grananja cijevne dionice (račvasti dio). Treba napomenuti da se na istom fizikalnom modelu HM 150.11 mogu dodatno sprovesti mjerenja i određivanje koeficijenata otpora na bilo kojem dijelu cijevne armature koje nisu obuhvaćene ovim radom, određivanje radnih karakteristika zaporne armature te mjerenje volumenskog protoka s mlaznicom, blendom, kosim ventilom ili Venturimetrom. Način pripreme i mjerenja tih eksperimenata opisan je u radovima [7, 8].

Kod ravnih cijevi, gubitak tlaka p_v i linijski gubitak ΔH_{tr} za ispitivanu cijev s trenjem određen je eksperimentalno. Mjerni eksperimenti na opisanom fizikalnom modelu namijenjeni su istraživanju utjecaja posebnih dijelova cjevovoda i spojnice na gubitak tlaka. Ti dijelovi su: cijevni lukovi ili koljena, račve, promjene u poprečnom presjeku cijevi, ventili i vezice. Za oštri lom cijevi dana je aproksimacija izračuna koeficijenta lokalnog gubitka koji ovisi o kutu loma cijevi te se može vidjeti njegov rast sa povećanjem loma. Kod kružnog luka (kut od 90°) koeficijent lokalnog gubitka ovisi o omjeru promjera cijevi D i radijusa R kružnog luka. U tom slučaju, pri konstantnom protoku i promjeru cijevi, lokalni koeficijent gubitaka na koljenu će se smanjivati uslijed povećanja omjera R/D .

Kod okomitih i kosih račvi potrebno je odvojiti slučaj spajanja protoka na glavnu cijev i slučaj račvanja protoka te unutar istih odvojiti gubitke za bočnu granu i glavnu cijev. Za sve ove slučajeve, koeficijent gubitaka ovisan je o omjerima dolaznih i izlaznih protoka te poprečnih presjeka. Koeficijent gubitka se smanjuje za bočnu granu što je ona manjeg presjeka u odnosu na glavnu cijev, dok se istovremeno koeficijent za glavnu cijev smanjuje.

Pri strujanju tekućine kroz cijev s naglim proširenjem ili naglim suženjem, koeficijent lokalnog gubitka izražen je u ovisnosti o omjerima površina poprečnih presjeka u samim profilima. Iz tih izraza lako se može zaključiti kako će gubici biti manji pri manjim promjenama geometrije, odnosno pri manjim omjerima promjera na početku i na kraju suženja ili proširenja. Kod naglog proširenja i suženja, koeficijent je prikazan u ovisnosti o omjeru poprečnih presjeka na početku i na kraju fazonskog komada te o središnjem kutu proširenja, odnosno suženja. Tu je vidljivo logično povećanje koeficijenta sa većom promjenom protočnog profila.

Zahvala. *Ovaj je članak rezultat rada u okviru projekta Razvoj istraživačke infrastrukture na Kampusu Sveučilišta u Rijeci (RC.2.2.06-0001), koji je sufinanciran iz Europskog fonda za regionalni razvoj (EFRR) i Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske.*

Literatura

- [1] Shaughnessy, E.J., Katz, I.M., Schaffer, J.P. (2005) *Introduction to Fluid Mechanics*, Oxford, Oxford University.
- [2] Žic, E., Ožanić, N., Karleuša, B. (2007) *Skripta zadataka iz kolegija Hidromehanike s teoretskim osnovama*, Rijeka, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci.
- [3] Lončar, G., Andročec, V. (2012) *Mehanika tekućina*, skripta iz kolegija Mehanika tekućina, Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- [4] Jović, V. (2006) *Osnove Hidrotehnike*, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split, Element.
- [5] Bukurov, M., Žic, E. (2017) *Mehanika fluida - teorijske osnove*, priručnik za potrebe studenata iz kolegija Hidromehanika, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka.
- [6] Agroskin, I.I. (1969) *Hidraulika*, Tehnička knjiga Zagreb, Zagreb.
- [7] Experiment instructions. (2012) *HM 150.11 Fluid Friction Apparatus*, G.U.N.T. Gerätebau GmbH, Bar.
- [8] Karabegović, A. (2017) *Fizikalni model određivanja lokalnih i linijskih gubitaka u cijevnom sustavu pod tlakom*, Završni rad iz kolegija Hidromehanika, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka.

FIZIKALNI MODEL FORMIRANJA GRANIČNOG SLOJA

PHYSICAL MODEL OF FORMING THE BOUNDARY LAYER

Mauro Pamić*, Elvis Žic*, Ignacijo Biluš, Luka Lešnik****

Sažetak

U radu se razmatraju temeljna načela za formiranje graničnog sloja kod ravninskih (2D) i prostornih (3D) objekata te je dat opis načina njegova formiranja pomoću fizikalnih modela HM 133 i HM 152 (tvrtnice GUNT), koji su sastavni dio hidrotehničkog laboratorija Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci. U prvom dijelu rada definirane su osnove gibanja tekućine putem Lagrangeovog i Eulerovog pristupa. Kroz tekstualne formulacije i grafičke prikaze objašnjeno je značenje trajektorija, strujnica, vektora brzina i ubrzanja, kao i njihova povezanost. Također je opisan pojam kutne deformacije koju trpi čestica tekućine uslijed gibanja. U nastavku rada dat je opis osnovnih teorijskih pretpostavki o formiranju graničnog sloja te triju vrsta tečenja obzirom na njegovo formiranje. Tu je i dio koji upućuje na važnost hrapavosti podloge i gradijenta tlaka na formiranje graničnog sloja. Zatim su prikazane zakonitosti utvrđene za sustave otvorenih kanala jer njima odgovaraju uvjeti na korištenim fizikalnim modelima. Nadalje su opisani principi rada dva navedena fizikalna modela, način pripreme samih eksperimentalnih ispitivanja te je provedena analiza opstrujavanja fluida na pojedinim ravninskim, 2D objektima (kružnog, pravokutnog i aerofilnog oblika) i prostornim, 3D objektima (cilindričnog i aerodinamičkog oblika).

Ključne riječi: gibanje fluida, granični sloj, opstrujavanje, fizikalni model, HM 133 i HM 152

Abstract

The paper deals with the basic principles of forming the boundary layer in linear (2D) and spatial (3D) objects, along with the description and manner of their forming using

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: {mauro.pamic@student.uniri.hr; elvis.zic@uniri.hr}

** Institut za energetsko, procesno i okolišno inženjerstvo, Tehnički fakultet Sveučilišta u Mariboru, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor
E-mail: {ignacijo.bilus@um.si; luka.lesnik@um.si}

physical models GUNT HM 133 and GUNT HM 152, which are an integral part of the hydro-technical laboratory of the Faculty of Civil Engineering, University in Rijeka. Firstly, the paper defines motion of liquid basics with Lagrange and Euler approach. The meaning of trajectories, streamlines, velocity vectors and acceleration, as well as their interdependence, were explained using textual formulations and graphic displays. The concept of angular deformities, suffered by particles of fluid due to movement, were also described. Furthermore, the paper describes the basic theoretical assumptions regarding formation of a boundary layer and three types of flow due to their formation. A part of paper also points to the importance of surface roughness and pressure gradient regarding the formation of the boundary layer. The legalitie, deremined for open channel systems, are also shown, because they correspond to the conditions of the applied physical modes. The paper describes the principles of work for the two stated physical models, the manner of preparing the experimental tests, and the conducted hydrodynamic analysis of fluid circulation on certain linear 2D structures (of circular, rectangular and aerofil shape) and spatial 3D structures (of cylindrical and aerodynamic shape).

Key words: fluid motion, boundary layer, fluid flow around the body, physical model, HM 133 and HM 152

1. Uvod

Granični sloj gotovo je neizostavna pojava kod nailaska vodenog toka na prepreku, kao i kod ohrapavljene podloge po kojoj fluid struji. Za opis takvih pojava moguća su dva polazišta, poznata kao Lagrangeov i Eulerov pristup, kojima se pretpostavlja način gibanja fluida [1]. Kod Lagrangeovog pristupa se za promatrani volumen V fluida prati gibanje relativno malog dijela tekućine (čestice). S obzirom na djelovanja kojima je čestica izložena te ograničenja definirana samim fluidom, moguće je pratiti strujanje fluida kao cjeline. Stoga je potrebno da se za svaku promatranu česticu definira njen položaj koji će ovisiti o koordinatama kontrolnog volumena u kojem se nalazi. Isto tako, čestica mora biti definirana vremenom, jer se promjenom vremena Δt_i mijenja i položaj čestice [2]. S druge strane, Eulerov pristup polazi od toga da se za promatrani volumen V fluida više ne prati gibanje pojedinih čestica tekućine, već se odabranu promatranu točku prostora nastoji fiksirati u vremenu i prostoru. U toj točki prostora se zatim promatra promjena svih fizikalnih veličina strujanja [2].

Prostor za koji se provodi analiza tečenja naziva se strujno polje. Ono je opisano nizom manjih polja koja su definirana pripadajućim fizikalnim veličinama (polje tlakova, polje brzina, polje ubrzanja i sl.). Polje brzine je vektorsko polje, što znači da svaki dio tekućine ima različitu brzinu po intenzitetu i smjeru. Ukoliko je poznat i vektor položaja odabranog dijela tekućine s obzirom na ishodište referentnog koordinatnog sustava, polje brzina bit će određeno za svaku točku tekućine. Ukoliko se fizikalne veličine

strujnog polja ne mijenjaju tijekom vremena niti u prostoru, riječ je o stacionarnom strujanju ($\vec{v} = \vec{v}(x, y, z)$). U suprotnom govorimo o nestacionarnom strujanju ($\vec{v} = \vec{v}(x, y, z, t)$). Brzina se definira kao prevaljeni put ds u vremenu dt . Ukoliko se taj izraz integrira po vremenu, dobit će se trajektorija, odnosno putanja koju određena čestica fluida prođe tijekom tečenja [1]. Ako se za neko strujno polje u svakoj točki definira vektor brzine \vec{v} u danom trenutku t , iscrtanu liniju, koja spaja točke tako da u svakoj od njih vektor brzine tangira, nazivamo strujnicom. Strujnice se ne mogu sjeći jer se čestica fluida u isto vrijeme ne može kretati u više smjerova [3,4]. Budući da kod stacionarnog tečenja ne dolazi do promjena fizikalnih veličina, trajektorije i strujnice će se preklapati. To nije tako u uvjetima nestacionarnog tečenja. Kada veći broj strujnica, koje su pozicionirane jedna do druge, presijecaju površinu A , takav skup strujnica nazivamo strujno vlakno. Kako se brzina, tlak ili bilo koja druga fizikalna veličina jednoliko raspoređuju kroz presjeka strujnog vlakna, problem se predstavlja kao jednodimenzionalni [1].

Promjena brzine \vec{v} u vremenu t , odnosno ubrzanje \vec{a} , još je jedna u nizu fizikalnih veličina od velikog značaja za područje hidrodinamike. Ubrzanje je, kao i brzina, vektorska veličina koja je definirana promjenom položaja vektora \vec{v} u određenom trenutku t . Za taj trenutak i taj položaj prati se ubrzanje ili usporenje čestice fluida uzduž strujnica, odnosno trajektorija ds . Ubrzanje sadrži komponentu tangencijalnog ubrzanja \vec{a}_t i komponentu centripetalnog ubrzanja \vec{a}_n tako što se tangencijalno ubrzanje javlja kao tangenta na strujnicu, dok je komponenta centripetalnog ubrzanja normala na strujnicu [1].

Osim promjene položaja, čestica fluida tijekom svog tečenja unutar strujnog polja trpi i deformaciju. Deformacija se kod čestice očituje u promjeni oblika na način da se mijenjaju vrijednosti početnih duljina stranica, kao i kutovi između njih. Ukoliko se želi dobiti vrijednost promjene oblika, čestica se mora gibati od jedne do druge položajne točke unutar strujnog polja za neko vrijeme t [1]. U radu [5] su detaljno dane formulacije i opis mogućih deformacija čestica fluida.

2. Dinamika realne tekućine

Zahvaljujući radu francuskog inženjera Osbornea Reynoldsa i pokusima koje je proveo, danas razlikujemo 3 vrste strujanja koja opisuju dinamiku realne tekućine. Za zatvorene cijevne sustave, Reynolds je definirao i objasnio načine strujanja i temeljne razlike između pojedinih strujanja. Upuštajući obojenu tekućinu u cijevi, usporedno promjeni brzine strujanja tekućine mijenjao se i način strujanja obojenog traga upuštene tekućine. Time je definirao postojanje laminarnog, prijelaznog i turbulentnog

strujanja. Kod sva tri oblika strujanja, trenje između graničnih površina i tekućine savladava se pomoću energije tlaka tako što se oduzima energija strujanja tekućine. Na taj se način zadržavaju karakteristični profili brzina [3,4].

Laminarno strujanje karakteriziraju vrlo male brzine. Budući da su brzine male, gibanje vlakna je u pravcu. Točnije, strujanje možemo opisati kao snop koncentričnih tankostjenih cjevčica „lamina“ za koje vrijedi, gledajući od ruba cijevi prema središtu, da im se brzina strujanja povećava, a najveću vrijednost doseže u središtu cijevi. Srednja brzina u cijevi može se proračunati na temelju izraza $\bar{v} = 0,5 \cdot v_{\max}$, dok raspodjela brzina poprima oblik paraboloida [3,4]. Također, razlikujemo potencijalno i vrtložno laminarno strujanje. Za postojeće profile brzina, kod potencijalnog strujanja ne dolazi do pojave vrtloga. Kod vrtložnog laminarnog strujanja, između dva sloja tekućine pri različitim brzinama dolazi do pojave pravilnih i stabilnih elementarnih vrtloga [4]. Navier-Stokesove diferencijalne jednadžbe u potpunosti opisuju laminarno strujanje gdje je:

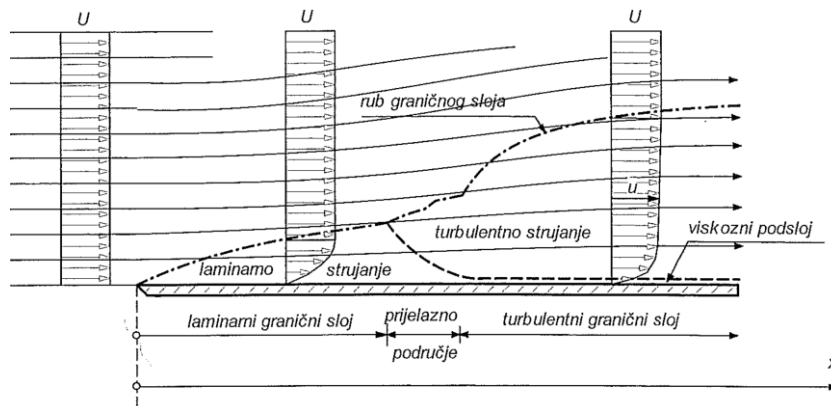
$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} \text{grad}p + \nu \Delta \vec{v} + \frac{1}{3} \nu \text{grad} \text{div} \vec{v} \quad (1)$$

izraz za vektorski oblik gibanja. Posljednja dva člana na desnoj strani određuju utjecaj sila viskoznosti. Ono što razlikuje Navier-Stokesove jednadžbe od Eulerovih jest član $\Delta \vec{v}$. Strujanje, čije su brzine vrijednosno između laminarnog i turbulentnog, naziva se prijelazno strujanje. Ono što razlikuje prijelazno strujanje od laminarnog je valovito gibanje nasuprot gibanja u pravcu, dok vlakno zadržava kontinuitet [3]. Sa sve većim rastom brzina strujanja vlakno počinje gubiti svoj kontinuitet te se na određenoj udaljenosti raspada. Raspadnuto vlakno se proteže duž cijelog presjeka cijevi, što dovodi do miješanja brzih i sporih čestica tekućine pa se tako brzina na stjenkama povećava, dok u središtu presjeka ona opada. Takvo strujanje naziva se turbulentno strujanje za koje raspodjela brzina poprima oblik rotacijske logaritamske krivulje, dok srednja brzina strujanja poprima izraz $\bar{v} = (0,75 \div 0,85) \cdot v_{\max}$ [6]. Kod turbulentnog strujanja ukupnu brzinu čine njena srednja vrijednost \bar{v} i tzv. oscilacija, odnosno odstupanje od njene srednje vrijednosti \bar{v}' u nekom vremenskom intervalu T mjerenja [5]. Kao dodatne mjere uvode se intenzitet turbulencije ($I = \frac{\sqrt{\bar{v}'^2}}{\bar{v}}$), koeficijent korelacije te učestalost oscilacija. Koeficijent korelacije služi kao pokazatelj međusobne povezanosti brzina trenutnih odstupanja. Nju povezujemo sa slučajem turbulentnosti dva djelića tekućine koja zbog različitih oscilacija u istu točku stižu u različitim vremenskim razmacima [6]. Učestalost oscilacija, kao treća uvedena mjera, važna je zato što je potrebno jasno odijeliti dvije vrste oscilacija koje se javljaju pri turbulentnom strujanju. Riječ je o makroskopskim i mikroskopskim oscilacijama. Ono što dijeli jednu

od druge jesu amplituda i frekvencija osciliranja. Pri makroskopskim oscilacijama amplitude su vrlo velike, što za posljedicu ima nisku frekvenciju osciliranja. Za mikroskopske oscilacije slučaj je upravo suprotan. Treba reći da su mikroskopske oscilacije sveprisutne i da uslijed visoke frekvencije dolazi do preraspodijele iz mehaničke u toplinsku energiju [6].

2.1. Granični sloj na ravnoj ploči

Svaki granični sloj koji se formira uslijed strujanja neposredno uz podlogu sadrži gradijente brzine zato što uz samu podlogu dio tekućine zaostaje uslijed lijepljenja za istu (utjecaj hrapavosti), dok se tok u središtu presjeka ne mijenja. Najbolji primjer toga je razvoj graničnog sloja na ravnoj ploči, koji se počinje javljati već na njenom samom početku. Neovisno o jačini turbulencije tekućine prije nailaska na ploču, na početku ploče će se uvijek razvijati laminarni granični sloj. Budući da je strujanje jednoliko, doći će do postepenog odmicanja strujnica od ploče, odnosno, uslijed smanjenja brzine poremećeni tok će se početi širiti. Kad Reynoldsov broj Re dosegne kritičnu vrijednost, tj. kada se sloj proširi, laminarni tok postaje sve uži i počinje se razvijati turbulencija (Slika 1) [3,6].



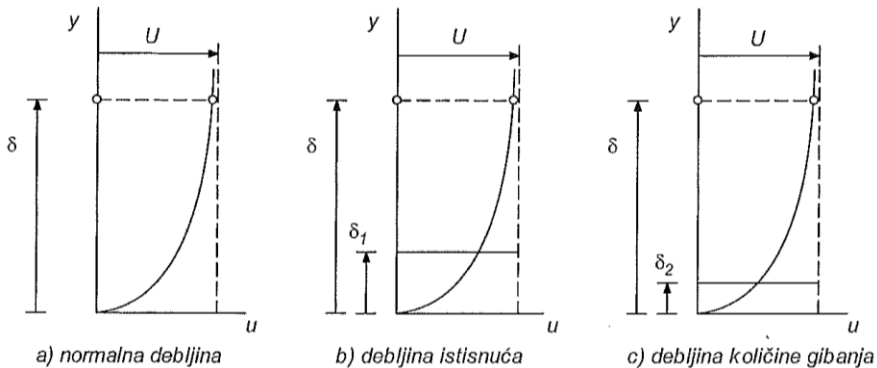
Slika 1. Razvoj graničnog sloja na ravnoj ploči [3]

Debljina graničnog sloja definirana je udaljenošću od ploče, gdje je brzina toka v_x manja za 1% u odnosu na neporemećenu brzinu toka U [3,6]. Osim debljine graničnog sloja postoje još i debljina istisnuća i debljina količine gibanja kao geometrijske karakteristike koje utječu na granični sloj. Debljinom istisnuća ili debljinom izgubljenog protoka δ_1 nastoji se ostvariti protok koji je jednak stvarnom protoku na način da pomikemo nepokretnu površinu prema osnovnoj struji sve dok se protoci ne ujednače (Slika 2). Unutar te debljine strujanje je poremećeno [3], a sama debljina izražena je kako slijedi:

$$U\delta_1 = \int_0^\delta (U - v_x) dy \quad (2)$$

Kroz debljinu izgubljene količine gibanja δ_2 nastoji se izjednačiti količina gibanja koja se izgubila uslijed opadanja brzine toka u graničnom sloju te količina gibanja unutar graničnog sloja konstantne brzine [6], iz čega slijedi:

$$\rho\delta_2 U^2 = \rho \int_0^\delta (U - v_x)v_x dy \quad \rightarrow \quad \delta_2 = \int_0^\delta \frac{v_x}{U} (1 - \frac{v_x}{U}) dy \quad (3)$$



Slika 2. Debljine dijelova graničnog sloja [3]





Trenje po podlozi u graničnom sloju javlja se kao posljedica lijepljenja fluida koji teče na podlozi, a njegova se vrijednost očituje u graničnom sloju, odnosno njegovom razvoju. Što je veći razvoj graničnog sloja, to će i otpor trenja biti veći. Kako bi se odredila točna vrijednost trenja potrebno je uravnotežiti količine gibanja. Ukoliko se promatra kontrolni volumen za dva bliska presjeka sa njihovim graničnim slojem i dijelom koji obuhvaća strujanje koje je neporemećeno, moguće je dobiti trenje na ploči čiji će koeficijent trenja c_f varirati ovisno o razvitku graničnog sloja [3]. Koeficijent se određuje prema izrazu $c_f = 2 \frac{d\delta_2}{dx}$ na temelju zakona o održanju količine gibanja kontrolnog volumena i detaljno je opisan u radu [5].

2.2. Hidrodinamički otpori u kanalima

Slično kao i na ravnoj ploči, granični se sloj razvija i u kanalima. Jedini problem njegova definiranja jest oblik poprečnog presjeka kanala. Problem se javlja zato što svaki kanal ima sebi svojstven oblik i promjenjiv poprečni presjek, čime se mijenjaju uvjeti toka. Otpor trenja kao sila, osim što se veže za podlogu, također se javlja i kod tijela uronjenih u tekućinu i zajedno sa otporom oblika uronjenog tijela predstavlja hidrodinamičke otpore. Dok je otpor trenja definiran brzinom toka, otpor oblika je određen i tlakom oko uronjenog tijela, a on će ovisiti o geometrijskim karakteristikama tijela, kao i samoj veličini. Vrlo je čest slučaj da pri manjim brzinama ukupnu silu otpora većim dijelom čini otpor trenja, dok je za veće brzine znatno izražen

otpor oblika. Ukupna sila otpora jednaka je zbroju otpora trenja i otpora oblika [4]. Često se vrtložni trag prihvaća kao mjera otpora jer se njegovim odnosom uzdužnog i poprečnog odmaka od uronjenog tijela definira koeficijent otpora c_D koji je ovisan o Reynoldsovom broju Re i geometriji uronjenog tijela (Tablica 1).

Tablica 1. Koeficijenti otpora pojedinih tijela pri opstrujavanju fluida [5]

Tijelo - struji s lijeva na desno	l/d	$Re = vd/\nu$	c_D
1. Kružni cilindar - os normalna na struju	1	10^5	0,63
	5		0,74
	20		0,90
	∞	$>5*10^5$	1,20
	5		0,35
	∞		0,33
2. Kružni cilindar - os paralelna struji	0	$>10^3$	1,12
	1		0,91
	2		0,85
	4		0,87
	7		0,99
3. Eliptični 	(2:1)	$4*10^4$	0,6
	(4:1)	10^5	0,46
	(8:1)	$2,5*10^4$ do 10^5	0,32
		$2,5*10^4$	0,29
	$2*10^5$	0,20	
4. Aeroprofil (1:3)	∞	$>4*10^4$	0,07
5. Pravokutna ploča normalna na struju gdje je l = dužina, d = širina	1	$> 10^3$	1,16
	5		1,20
	20		1,50
	∞		1,90
6. Kvadratna prizma 		$3,5*10^4$	2,0
		10^4 do 10^5	1,6
7. Trostrana prizma 120° 60° 30° 		$> 10^4$	2,0
			1,72
		$> 10^5$	2,20
			1,39
			1,80
			1,0
8. Poluloptasta ljuska 		$> 10^3$	1,33
		10^3 do 10^5	0,4
9. Disk normalan u struji		$> 10^3$	1,12

Ono što karakterizira turbulentni granični sloj je izražena turbulentna zona s vrtlozima putem kojih se ostvaruje izmjena količine gibanja. To područje naziva se i turbulentnom jezgrom, a definiraju ga prevladavajuće sile inercije u odnosu na sile viskoznosti. Tek na manjem dijelu graničnog sloja, točnije, u viskoznom podsloju, sile viskoznosti dolaze do izražaja te on, zajedno sa područjem prijelaza i zidnom turbulencijom, čini unutarnju zonu graničnog sloja [6]. Upravo je zidna turbulencija područje unutar graničnog sloja u kojem se vrijednosti sila viskoznosti i turbulencije donekle izjednačavaju te nastupa izmjena turbulentnih virova. Što je turbulentno područje više izraženo, to će brzina u podsloju biti veća, što za rezultat ima i veća naprezanja na zidu.

2.3. Svojstva graničnog sloja sa gradijentom tlaka

Pri nejednolikom strujanju, osim brzine, na sam razvitak graničnog sloja također značajno utječe i gradijent tlaka. Pri ubrzavajućem strujanju, zahvaljujući porastu brzine (a, sukladno s time, i padu tlaka), uslijed jakog naleta uzdužne struje dolazi do nemogućnosti zadržavanja vrtloga nastalih na graničnom sloju. Stoga se granični sloj ne širi i ostaje vrlo tanak. Kod usporavajućih strujanja efekt je upravo suprotan [6].

Odvajanje graničnog sloja karakteristika je usporavajućih strujanja, a nastupa uslijed kontinuiranog širenja graničnog sloja. Naime, pri neprestanom širenju graničnog sloja, tangente na brzine sve više teže okomitosti prema podlozi, a usporedno s time se trenje po ploči smanjuje sve do stanja njegova nepostojanja. Nepostojanje trenja, odnosno vrijednost trenja jednaka 0, nastat će u trenutku kada tangenta bude okomita na ploču. Kako tlak sve više raste, stvara se struja koja se vraća te, u točki okomite tangente te odvaja granični sloj od podloge (točka separacije). Bilo da se radi o ravnoj ili zakrivljenoj podlozi, ključnu ulogu u odvajanju graničnog sloja odigravaju pad brzine toka i porast tlaka, a odvajanje se događa na mjestu gdje je gibanje zaustavljeno [3,6].

Svako tijelo koje je uronjeno u tekućinu i pritom opstrujavano tom istom tekućinom podvrgnuto je djelovanju naprezanja τ . Naprezanje koje djeluje na tijelo u smjeru toka jest tlačno naprezanje. Ako se to naprezanje uvede pod integral određen poprečnim presjekom uronjenog tijela A , kao rezultat se dobiva vrijednost sile otpora tijela F_x :

$$F_x = \int_A^0 (-p \cos \theta) dA + \int_A^0 (\tau \sin \theta) dA \quad (4)$$

pri čemu prvi član predstavlja silu otpora oblika, a drugi silu otpora trenja [1]. Oblik uronjenog tijela u krajnosti utječe na raspodjelu tlaka p koji se manifestira preko sile otpora, što ukazuje na važnost izračuna vrijednosti same sile. Sila otpora će biti jednaka nuli iznimno kod „idealne tekućine“

gdje ne dolazi do pojave graničnog sloja. U svim ostalim slučajevima sila otpora se može proračunati preko izraza:

$$F_x = C_x \rho A_p \frac{v_o^2}{2} \quad (5)$$

gdje je C_x bezdimenzionalni koeficijent otpora tijela, ρ gustoća tekućine, a A_p površina ortogonalne projekcije tijela na vertikalnu ravninu okomitu na strujnice [1]. Sila otpora F_x , gustoća tekućine ρ , brzina opstrujavanja v_o kao i površina presjeka tijela A_p vrlo su lako odredive, što za rezultat ima već unaprijed određene vrijednosti koeficijenata otpora C_x , bilo da je riječ o 2D ili 3D oblicima tijela. U radu [5] su navedene vrijednosti koeficijenata otpora C_x u funkciji Reynoldsovog broja Re za 2D i 3D modele tijela prema autorima Robinsonu i Croueu (1993.).

3. Korišteni fizikalni modeli

Za potrebe fizičkog ispitivanja graničnog sloja poslužila su dva fizikalna modela (HM 133 i HM 152) firme GUNT, uspostavljena u sklopu hidrotehničkog laboratorija Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci. Budući da se hidrauličke zakonitosti ne baziraju samo na teorijskoj osnovi, ovim se pokusima nastojala potkrijepiti njihova valjanost kroz fizikalne procese. Fizikalni modeli su izrađeni u prigodnom mjerilu te na temelju sličnosti sa proučavanom hidrauličkom pojavom omogućuju zorni uvid u fenomene pojave. Budući da je model znatno manji i definiran mjerilom, pomoću faktora mjerila po Froudeovom i Reynoldsovom zakonu sličnosti moguće je za svaku od fizikalnih veličina dobiti njenu stvarnu (realnu) vrijednost. Pomoću modela se nastojalo dobiti uvid u formiranje graničnih slojeva s obzirom na različite oblike 2D ili 3D tijela koje se postavlja unutar radne plohe (sekcije) fizikalnog modela.

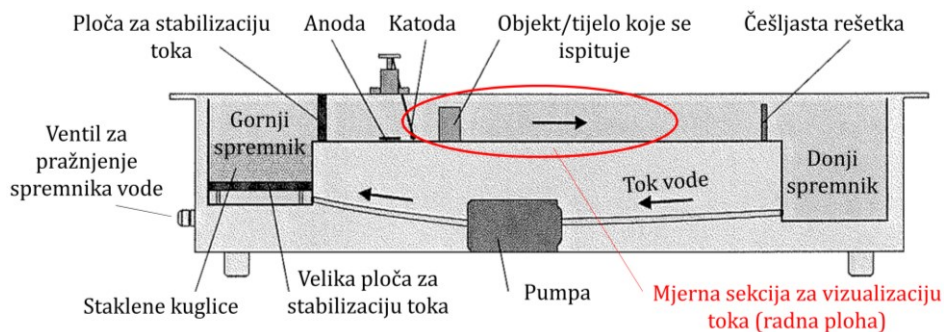
Prvi fizikalni model koji je korišten je fizikalni model HM 133. Preko napajanja električnom energijom model proizvodi mjehuriće kojima se prikazuju strujnice (u konačnici snop strujnica – linijskih ili krivolinijskih – formiranje turbulencija). Preko niza postavljenih tijela omogućen je prikaz velikog broja opstrujavanja fluida oko istih, a mnoge se od tih pojava mogu pojaviti u svakodnevnim hidrodinamičkim procesima. Zahvaljujući svom pravokutnom obliku presjeka kanala i posebnom obliku osvjetljenja može se vrlo dobro vizualizirati tip strujanja pri odgovarajućim vrijednostima protoka Q , odnosno brzine v .

Drugi model koji se koristi za ispitivanje je fizikalni model HM 152. Specifičnost ovog modela je rešetkasta ploča kroz koju teče/cirkulira voda s lijeva na desno (gornji i donji spremnik sa ugrađenom pumpom), pri čemu se usporedno upušta i posebna tinktura za formiranje strujnica, odnosno

strujnog polja. Dotok vode regulira se preko dovodnog ventila, dok se tinktura (medij) u nju upušta putem 19 mlaznica (proizvoljno odabranih u radu). Na ploču je moguće položiti 2D tijela raznovrsnih oblika, dok se sustavom ventila u toku mogu izazvati umjetne pojave poput izvora ili ponora. Primjenom različitih kombinacija na modelu moguće je vidjeti promjene u toku uslijed opstrujavanja fluida oko različitih oblika tijela pri formiranju izvora ili ponora te na taj način dobiti jasnu sliku strujnog polja s potrebnim strujnicama i ekvipotencijalama.

3.1. Fizikalni model HM 133

Fizikalni model HM 133 sastoji se od protočnog kanala ugrađenog u polistirenski spremnik [7]. Crpka, postavljena u kućište ispod polistirenskog spremnika, osigurava kontinuiranu cirkulaciju vode. Brzina protoka se prilagođava pomoću crpke koja ima mogućnost regulacije brzine okretnog kola. Kako bi se protok na ulaznom dijelu spremnika usporio, koriste se staklene kuglice, dok se reguliranje razine vode na području mjerne sekcije postiže preko pregrade s prorezima poput „češlja“. Za vizualizaciju toka koriste se mali vodikovi mjehurići koji se stvaraju preko platinaste žice elektrolizom. Platinasta žica je spojena s negativnim polom na istosmjerni napon i djeluje kao katoda, dok ploča od nehrđajućeg čelika koja je uronjena u vodu djeluje kao anoda (Slika 3 i 4). Za povećanje vodljivosti tekućine i gustoće mjehurića dodaje se natrijev sulfat dekahidrat ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, Glauberova sol, tenardit). Razvoj mjehurića može se kontrolirati i regulirati preko kontrolne ploče (regulatora mjehurića vodika), odnosno povećanjem jakosti struje preko anode i katode. Kako bi se mjehurići vodika jasnije vidjeli, mjerna sekcija za vizualizaciju toka (radna ploha) je osvijetljena jakim bijelim svjetlom s obje bočne strane. Radna ploha je opremljena prozorom od pleksiglasa dužine 200 mm, a svjetlost osiguravaju bijele led lampice visoke snage (Slika 4).



Slika 3. Fizikalni model HM 133 (bokocrt) [7]

Tehničke karakteristike fizikalnog modela su sljedeće: maksimalni protok pumpe $Q=20$ l/min., generator mjehurića (struja: 0-200 mA, pauza 8,4-1800 ms, impuls 8,4-1800 ms, 3 katodne žice od platine promjera 0,2 mm, duljine 30, 50 i 75 mm te volumen vode za rad na modelu koji iznosi oko 6 litara (poželjno je da fizikalni model bude dobro ispunjen vodom kako ne bi došlo do moguće pojave uvlačenja zraka kroz usisnu cijev pri radu pumpe).

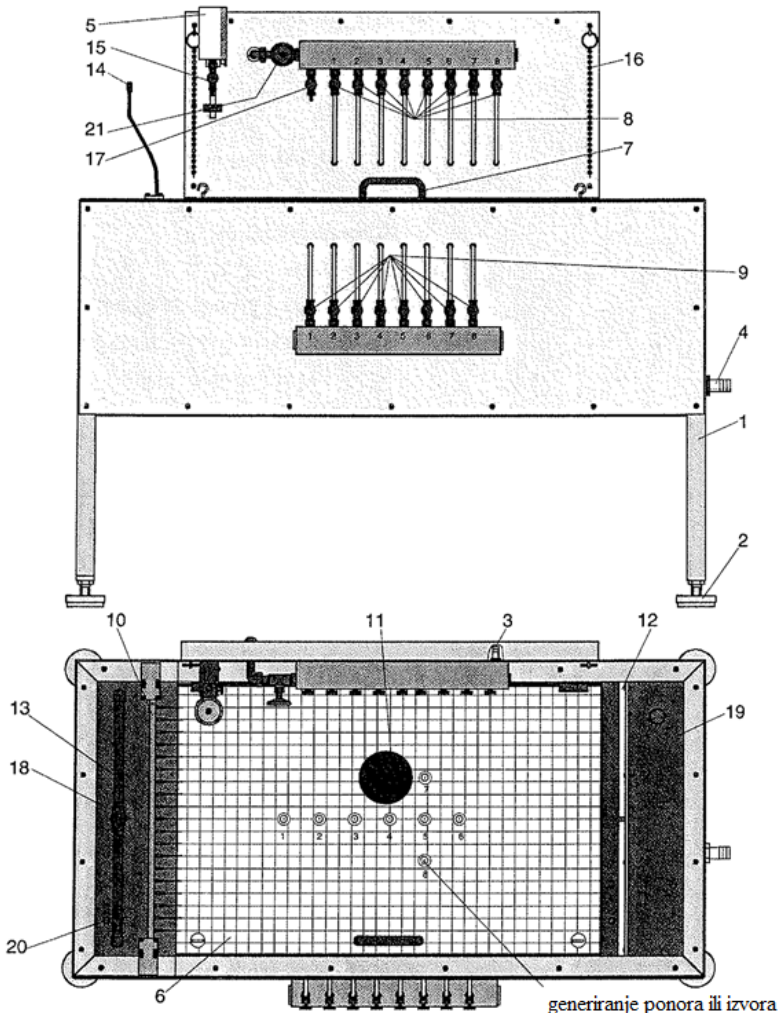


Slika 4. Rad na fizikalnom modelu HM 133 (Foto: Mauro Pamić)

3.2. Fizikalni model HM 152

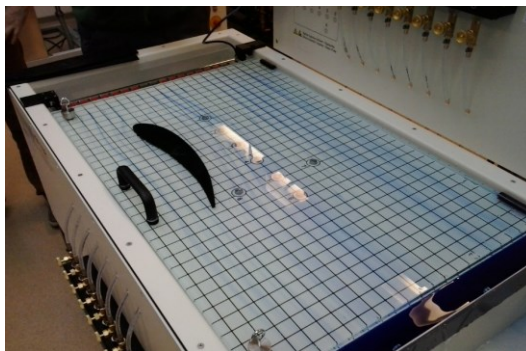
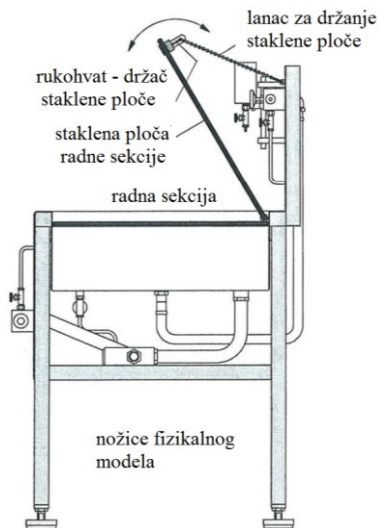
Količina vode koja teče kroz područje između staklenih ploča može se kontrolirati preko dovodnog ventila. Voda koja se akumulira u gornjem spremniku potiskuje se kroz protočnu ploču (radnu sekciju, radnu ploču), dolazi u donji spremnik vode i konačno završava u posudi za pražnjenje [8] (Slika 5 i 6). Putem odvodne cijevi omogućeno je pražnjenje fizikalnog modela. Medij (najčešće plava tinktura) se sa područja punjenja kroz spojnu i distribucijsku cijev dalje vodi do 19 mlaznica (11 injekcijskih cjevčica za generiranje strujnica i 8 mlaznica za generiranje/formiranje izvora ili ponora) koje upuštaju tinkturu u radnu ploču na kojoj se promatra opstrujavanje fluida oko danog ravninskog tijela. Fizikalni model HM 152 omogućuje ispitivaču da prema potrebi ispita opstrujavanje fluida oko tijela bilo kojeg hidrodinamičkog oblika, što ovaj model čini veoma korisnim (Slika 6). Proizvoljni oblici tijela za koje se želi napraviti analiza opstrujavanja fluidom na danom modelu vrlo se jednostavno mogu izraditi (isprintati) na 3D printeru koji se nalazi u hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci. Tehničke karakteristike fizikalnog modela su: dvije staklene ploče dimenzija $Dx\check{S}=910x585$ mm na razmaku od 5 mm, 8 spojeva (izvor/ponor), spremnik za boju od 200 ml,

dok su ukupne dimenzije fizikalnog modela $D \times \mathcal{S} \times V = 1350 \times 700 \times 1380$ mm, a količina vode potrebna za rad iznosi oko 300 l/h.



Slika 5. Osnovni elementi fizikalnog modela HM 152 [8]

- 1- nožica, 2 - stabilizatori postolja modela, 3 - dovod vode, 4 - odvod vode, 5 - spremnik za tinkturu, 6 - radna sekcija, 7 - držač staklene plohe, 8 - ventili za formiranje izvora ili ponora na radnoj sekciji, 9 - ventili za reguliranje dotoka tinkture, 10 - distribucijska cijev za dovod vode (gornji spremnik), 11 - tijelo koje se analizira, 12 - pregrada za stabilizaciju toka, 13 - gornji spremnik vode, 14 - konekcijsko crijevo za distribucijsku cijev, 15 - ventil za reguliranje dovoda tinkture, 16 - lanac za osiguranje (pridržavanje) staklene plohe, 17 - ventil za čišćenje injekcijskih mlaznica, 18 - perforirana cijev za dovod vode, 19 - donji spremnik vode, 20 - ventil za reguliranje dotoka vode, 21 - ventil za reguliranje dovoda tinkture



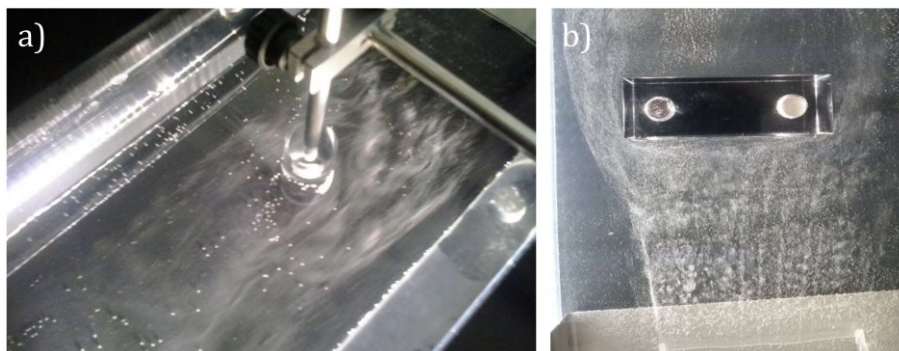
Slika 6. Fizikalni model HM 152 (lijevo) i aerofilno tijelo koje se ispituje (desno)

4. Provedba i analiza fizikalnih ispitivanja

4.1. Fizikalni model HM 133

PRIMJER 1 – opstrujavanje fluida oko cilindričnog hidrotehničkog tijela

Uslijed nailaska toka na cilindrično tijelo dolazi do deformiranja strujnica i stvaranja graničnog sloja uz samo tijelo (Slika 7.a). S obzirom da je tijelo cilindričnog oblika, i s jedne i druge strane presjeka postoji simetrično odvajanje graničnog sloja u smjeru toka.



Slika 7. a) Opstrujavanje fluida oko cilindričnog hidrotehničkog tijela – PRIMJER 1.
b) opstrujavanje fluida oko hidrotehničkog tijela pravokutnog oblika - PRIMJER 2 [6]

Točke separacije se nalaze na mjestima koja su dulja od polovine promjera kružnog presjeka. Uslijed takvoga odvajanja, neposredno iza tijela formiraju se blagi vrtlozi. Budući da brzina strujanja nije toliko intenzivna, na kojih 20-tak cm iza tijela strujnice se uravnotežuju te tok postaje stabilan (gotovo laminaran).

PRIMJER 2 – Opstrujavanje fluida oko tijela pravokutnog oblika

Kao što je vidljivo iz slike 7.b, nailaskom toka fluida na izduženo tijelo postavljeno okomito na tok dolazi do formiranja graničnog sloja na bočnim rubovima zbog značajnih otpora samog tijela. Naime, tijelo se blago opstrujava (s vrlo blagim formiranjem vrtloga), jer svojom formom uvjetuje odvajanje graničnog sloja već na rubovima. Točke odvajanja (separacije) se na obje strane nalaze u vrhovima tijela. Odvajanje uzrokuje i nastanak blagih vrtloga te deformaciju strujnica u nizvodnom toku.

PRIMJER 3 – Opstrujavanje fluida oko zaobljenog pločastog tijela

Ovako položeno zaobljeno pločasto tijelo daje specifičnu sliku toka i podosta drugačije strujanje u odnosu na prethodna dva primjera (Slika 8). Naime, dok se na jednoj strani formira granični sloj duž cijele zakrivljene pločice i točka separacije nije vidljiva, na drugoj se pak strani granični sloj odvaja već na samom početku nailaska toka. Budući da je debljina pločice vrlo mala, za posljedicu će imati intenzivno stvaranje vrtloga.



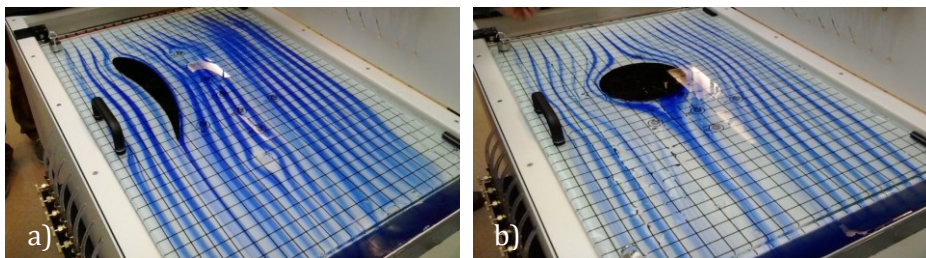
Slika 8. Opstrujavanje fluida oko zaobljenog tijela – PRIMJER 3 [6]

4.2. Fizikalni model HM 152

PRIMJER 1. – Opstrujavanje fluida oko aerofilnog tijela i izvora

Upuštanjem medija (tinkture) u gornju ploču fizikalnog modela dobiva se vrlo jasna slika promjene strujnog polja nailaskom fluida na aerofilni model (Slika 9.a). Na aerofilnom 2D tijelu se s obje strane formira granični sloj. Dok je s jedne strane on vrlo uzak i praktički priljubljen uz tijelo, s druge je strane on pomalo odmaknut. Zanimljivo je napomenuti kako između 2D

tijela i izvora dolazi do sužavanja razmaka strujnica, što ukazuje na to da izvor uslijed nailaska strujnog toka također biva opstrujavan i da tok ne utječe na njegovu postojanost [6].



Slika 9. a) Opstrujavanje fluida oko aerofilnog tijela i izvora – PRIMJER 1, b) opstrujavanje fluida oko kružnog ravninskog tijela - PRIMJER 2 (Foto: Mauro Pamić) [6]

PRIMJER 2 – Opstrujavanje fluida oko kružnog ravninskog tijela

Ono što je karakteristično kod opstrujavanja fluida oko ovakvih tijela je to da po cijeloj širini toka dolazi do pojave simetričnog deformiranja strujnica (simetrična strujna slika u odnosu na poprečni presjek tijela). Za vrlo sporo tečenje granični sloj se formira iza samog promjera poprečnog presjeka tijela (nizvodniji dio kruga), a nakon njegova odvajanja se iza tijela formira gotovo stabilizirajući snop strujnica (strujnice su gotovo paralelne), kako je vidljivo na slici 9.b).

5. Zaključak

Problematika ovog rada fokusirana je na formiranje graničnog sloja te na ispitivanja putem fizikalnih modela HM 133 i HM 152. Graničnim slojem smatra se prostorni dio fluida koji teče neposredno uz podlogu ili u ovom slučaju neposredno uz razna uronjena geometrijska tijela, na kojem dolazi do odvajanja, tj. javlja se tzv. točka separacije. U ovom su se radu analizirala eksperimentalna ispitivanja pojave graničnog sloja kao posljedica opstrujavanja geometrijskih i prostorno različitih 2D i 3D tijela (kružnog, pravokutnog i aerofilnog oblika). Cilj ovih ispitivanja bio je dobiti jasnu strujnu sliku pri opstrujavanju fluida oko tijela opisanih oblika.

Pokazalo se da su korišteni fizikalni modeli dobri za provođenje ispitivanja jer ispitivaču daju mogućnost zornog doživljaja pojave te promatranja opstrujavanja fluida oko različitih oblika tijela, kako ravninskih tako i prostornih. To jasno ukazuje na vrijednost ovih fizikalnih modela za edukacijske i druge svrhe Građevinskog fakulteta u Rijeci.

Dobivena saznanja i hidrauličke analize temeljene na fizikalnim modelima moguće je usporediti sa numeričkim modelima koji se dotiču iste

problematike. Dokazala je to provedena i u radu predstavljena analiza, ali može se ukazati i na daljnje mogućnosti. Tako je, na primjer, kod izvora i ponora na fizikalnom modelu HM 152, s obzirom na intenzitet izviranja ili poniranja, moguće dobiti jasan prikaz brzine širenja npr. oblaka zagađenja, brzinu tečenja onečišćene vode kroz prostor te kakav je njezin utjecaj na daljnji tok. Također, za potrebe izgradnje lukobrana ili pera na riječnim tokovima, primjenom fizikalnog modela HM 133, za tijelo istog poprečnog presjeka kao lukobran vrlo se dobro mogu predvidjeti refrakcija i difrakcija valova, kao i mogući otpori pri tečenju. Konačno i konkretno, u nekom sljedećem radu, za odabrane hidrauličke oblike tijela može se putem PIV tehnologije (*engl. Particle Image Velocimetry*) izvršiti vizualizacija i hidraulička analiza opstrujavanja fluidom radi dobivanja jasnije slike 2D ili 3D polja vektora brzina.

Zahvala. Članak je rezultat rada u okviru projekta „Razvoj istraživačke infrastrukture na Kampusu Sveučilišta u Rijeci (RC.2.2.06-0001)“, koji sufinanciraju Europski fond za regionalni razvoj (EFRR) i Ministarstvu znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske. Rad se također sufinancira iz istraživačke potpore Sveučilišta u Rijeci pod nazivom „Hidrologija vodnih resursa i identifikacija rizika od poplava i blatnih tokova na krškom području“.

Literatura

- [1] Lončar, G., Andročec, V. (2010) *Mehanika tekućina*, skripta predavanja iz kolegija Mehanika fluida, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- [2] Žic, E. (2017) *Kinematika fluida*, predavanja iz kolegija Hidromehanika, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka.
- [3] Jović, V. (2006) *Osnove hidrotehnike*, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split, Element.
- [4] Bukurov, M., Žic, E. (2017) *Dinamika viskoznog fluida*, iz priručnika MEHANIKA FLUIDA - teoretske osnove, radni priručnik za potrebe studenata na kolegiju Mehanika fluida i Hidromehanika, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka.
- [5] Pamić, M. (2017) *Fizikalni model formiranja graničnog sloja*, Završni rad iz kolegija Hidromehanika, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka.
- [6] Žic, E., Ožanić, N., Karleuša, B. (2012) *Mehanika fluida – teoretske osnove s riješenim zadacima*, Skripta zadataka iz kolegija hidromehanika, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka.
- [7] Gunt HM 133. (2011) *Visualisation of Flow Fields*, priručnik za rad s fizikalnim modelom HM 133, Hamburg, Gunt Hamburg Ltd.
- [8] Gunt HM 152. (1999) *Flow Visualisation Table*, priručnik za rad s fizikalnim modelom HM 152, Hamburg, Gunt Hamburg Ltd.

ANALIZA UČINKA RADA BAGERA PRIMJENOM METODE KRONOMETRAŽE

ANALYSIS OF EXCAVATOR WORK EFFICIENCY BY APPYLING CHRONOMETRY METHOD

Ana Berljafa*, Ivan Marović**, Diana Car-Pušić**

Sažetak

Problemi koje unutar područja organizacije proizvodnje rješava znanstvena disciplina studija rada počeli su se na našim prostorima sustavno rješavati 1960tih godina, a razvoj metoda koje se pritom koriste (npr. kronometraže) traje i danas. Značaj studije rada jest nastojanje racionalizacije organiziranja rada kroz definiranje i praćenje sastavnih elemenata vremena rada s ciljem utvrđivanja normativa koji će vrijediti za radnu operaciju u cjelini. Izračunavanje praktičnih učinaka građevinske mehanizacije je od velike važnosti za utvrđivanje što realnijeg trajanja strojnog rada na gradilištu, a time i veće točnosti predviđanja trajanja cjelokupnog građevinskog projekta. Okosnica ovoga rada je studija i analiza vremena jednog standardnog cikličkog građevinskog stroja u svom jednom tehnološkom postupku. Pritom se promatrala i analizirala radna operacija utovara bagerom u transportno sredstvo. Korištena je povratna metoda kronometraže kojom su se prikupljali podaci na gradilištu s ciljem normiranja rada odnosno utvrđivanja stvarnog učinka rada bagera pri utovaru. Podaci dobiveni mjerenjem su analizirani te je izračunato stvarno vrijeme definiranog tehnološkog postupka i njemu pripadajući normativ. Također, izvršila se usporedba s proračunom praktičnog učinka strojnog rada koji je izračunat pomoću normiranih tablica za proračun učinka standardnog cikličkog građevinskog stroja. Usporedbom su utvrđena odstupanja između izračuna temeljenih na mjerenim podacima i izračunima temeljenim na postojećim tablicama za izračun praktičnog učinka stroja. Analizirana su utvrđena odstupanja kao i razlozi njihova nastanka te su doneseni zaključci s preporukama za ažuriranje postojećih proračunskih tablica.

Ključne riječi: bager, metoda kronometraže, mjerenje, studij rada, učinak

*Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: ana.berljafa@student.uniri.hr

**Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: {ivan.marovic,diana.car.pusic}@gradri.uniri.hr

Abstract

Problems within the area of production organization, which are solved by scientific discipline of the work-study, have begun to be systematically dealt with in our region during 1960s, and method development (such as chronometry) persists today. The significance of the work-study is the attempt to rationalize the work organization through the definition and monitoring of the constituent elements of working time with the aim of establishing the norms that will be valid for the work operation as a whole. The calculation of construction machinery practical effect is of great importance for determining the more realistic duration of machine work on construction site, and thus the more accurate prediction of the whole construction project duration. The main topic of this paper is the time study analysis of a standard cyclic construction machine in its one technological process. At the same time, the work operation of the excavator loading into transportation vehicle has been observed and analyzed. Data were obtained by snapback chronometry method with the purpose of determining work efficiency i.e. defining the actual excavator work efficiency during the operation of loading. The data obtained by measurement were analyzed and the actual time of defined technological process was calculated as well as a corresponding normative. Moreover, a comparison was made with the calculation of excavator practical effect, which was calculated using the standardized tables for the calculation of standard cyclic construction machine. The comparison resulted in differences between these two approaches. The identified deviations were analyzed as well as the reasons for their occurrence and conclusions were drawn resulting in recommendations for updating the existing standardized tables for the calculation.

Key words: *excavator, chronometry method, measurement, work-study, efficiency*

1. Uvod

Svakodnevno svjedočimo rastu i dominaciji automatizacije, sve novijih generacija elektroničkih računala i elektroničke obrade podataka te uvođenja robota u područje graditeljstva [1] za obavljanje poslova koje je do sada obavljao čovjek. Predviđa se [2] da će do 2020. na tržištu rada poslove obavljati 1,7 milijun novih industrijskih robota s prosječnim godišnjim povećanjem njihova broja od 15%. Navedeno predviđanje se isključivo odnosi na područje industrijske proizvodnje, no za očekivati je da će se i u ostalim proizvodnjama na otvorenom, odnosno građenju na gradilištima značajno povećati broj robota i učestalost njihova korištenja.

Ukoliko se proizvodni proces graditeljstva usporedi s industrijskom proizvodnjom, može se zaključiti da se radi o specifičnom obliku proizvodnje koju karakteriziraju sljedeće specifičnosti [3]:

- proizvod je nepomičan dok su proizvodni čimbenici (rad i tehnologije) pomični,

- rad se obavlja na otvorenom prostoru (utjecaj vremenskih prilika i klime, sezonski karakter proizvodnje i dr.),
- pojedinačnost proizvodnje i dr.

Pritom se rad definira [4] kao „svjesno organizirana, svrsishodna djelatnost ljudi radi postizanja nekog korisnog učinka koja zadovoljava određenu pojedinačnu ili društvenu potrebu“. No, da bi se rad organizirao, potrebno ga je na neki način podijeliti i usustaviti [5, 6]. Te dijelove nazivamo radnim procesima, a razlikuju se po opisu, izvršiteljima, mjestu rada, primjeni ručnih alata i strojeva i dr. Bez obzira radi li se o ručnom, strojno-ručnom ili strojnom radu, svaki je rad povezan s čovjekom. Klepac [7] navodi kako se radni proces u građevinarstvu općenito definira kao „dio ukupnog rada na građevini kojim se izvodi neka cjelina ili dio građevine, a izvršavaju ga organizirane radne grupe stalnog sastava koje po potrebi mijenjaju alate i koriste se različitim materijalima“. Radujković i dr. [6] naglašavaju da je upravo stalnost sastava jednom uspostavljene radne grupe u nekom radnom procesu na nekom gradilištu važan podatak te predstavlja uporište za organizaciju tog dijela rada u analizama i proračunima.

Stoga je važno razumijevati rad i njegovu podjelu na složene radne procese, radne procese, radne operacije, radne postupke i radne pokrete. Ranija istraživanja [7] navode da se kod organizacije većine građevinskih procesa koriste samo prve tri navedene razine, naročito ukoliko se radi o građevinskim radovima koji se masovno ponavljaju jer samo takav rad ima smisla proučavati, optimizirati i organizirati.

Utvrđivanje što realnijih praktičnih učinaka standardne građevinske mehanizacije i njihovih normativa rada jedan je od ključnih preduvjeta planiranja strojnog rada na gradilištu [8]. Car-Pušić i dr. [8] utvrdili su postojanje razlika između učinaka dobivenih u fazi planiranja i onih dobivenih mjerenjem na terenu te pokazali da problem proizlazi iz normiranih vrijednosti koeficijenata [9-12] vezanih uz organizacijske uvjete. Daljnja istraživanja [13, 14] u kojima je primijenjena metoda kronometraže potvrdila su da je mjerni učinak strojeva u odnosu na planirani učinak veći i do 30%.

Pritom se odnos između praktičnog učinka (U_P), mjenog učinka (U_M) i teoretskog učinka (U_T) promatra kao $U_P \leq U_M < U_T$ iako se u građevinskoj praksi taj odnos ponekad promijeni u $U_M \leq U_P < U_T$.

Stoga su, uz propitivanje navedenog odnosa, glavni ciljevi ovoga rada utvrđivanje postojanja odstupanja između normativa rada dobivenog mjerenjem na terenu i onog dobivenog proračunom putem normiranih vrijednosti te koliko odstupanje iznosi za promatrani radni proces. U slučaju

značajnih odstupanja cilj je utvrditi razloge njihova nastajanja s obzirom na koeficijente redukcije iz postojećih proračunskih tablica.

2. Pregled područja studija rada

Proučavanje elemenata i metoda rada sastavni je dio svih organizacijskih teorija, pri čemu se u fokus uvijek stavlja učinkovitost i sigurnost pri radu, uz racionalizaciju pokreta, tj. ergonomiju, što u svom krajnjem obliku dovodi do humanizacije rada. Pritom treba imati u vidu da se rad strogo promatra s aspekta ograničenih postojećih resursa i racionalnog korištenja svih oblika energije.

Pristupi proučavanju elemenata i metoda rada temelje se na raščlanjivanjima složenog rada na jednostavne dijelove koji se mogu lakše razumjeti, opisati i organizirati, a povezani su s teoretičarima razvoja klasične teorije organizacije krajem 19. stoljeća koja se razvijala u tri glavna smjera [6]:

- znanstveni pristup upravljanju koji je razvijao Frederick W. Taylor,
- administrativna teorija upravljanja Henryja Fayola,
- model birokratske organizacije Maxa Webera.

Za razliku od navedenih, na građevinarstvo su poseban utjecaj imala proučavanja Granta i bračnog para Gilbreth [6, 7], čija su istraživanja vezana uz povećanje učinkovitosti radu pritom analizirajući pokrete pri radu (engl. Motion Study). Sustavni pristup studiji vremena postavio je Taylor u svom djelu [15] u kojem je postavio četiri bitne odrednice studije vremena i studije pokreta (engl. Time and Motion Study) čiji se principi primjenjuju i danas. Taylorove postavke mogu se sažeti na sljedeće:

- istražiti najbolji način rada,
- za postizanje uspjeha u radu potrebno je proučavati vrijeme da bi se izvršitelju rada mogle dati jasne upute,
- grubo mjerenje vremena zamijeniti što preciznijim,
- istražiti gubitke vremena te opravdane priznati.

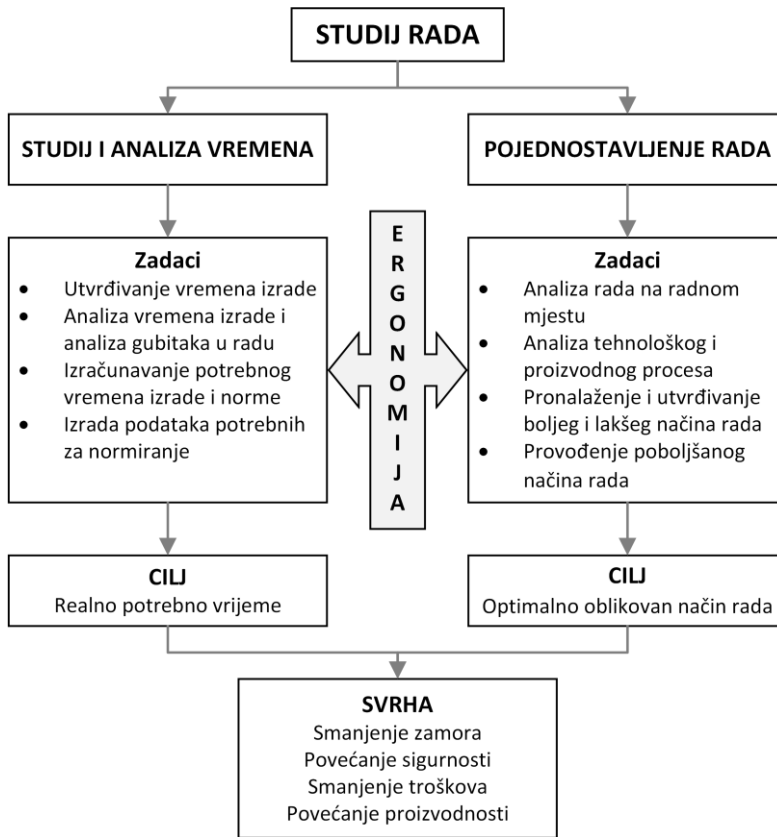
Studija rada može se definirati kao disciplina unutar područja organizacije proizvodnje čiji je zadatak da se znanstvenim metodama, logički, cjelovitim i sustavnim analizama nekog prethodno definiranog rada dođe do optimalnog oblikovanja načina rada te realno potrebnog vremena izrade. Taboršak [5] navodi da se pritom utvrđivanje optimalno oblikovanog načina rada odnosi na prilagođavanje radnog mjesta, metoda i uvjeta rada, dok nam utvrđivanje realno potrebnog vremena izrade služi za

ispravno izračunavanje norme koja prema svojoj definiciji predstavlja „organizacijsko mjerilo humano oblikovanog rada“.

Rezultati aktivnog provođenja studija rada su mnogobrojni te su izraženi ne samo u povećanju proizvodnje i smanjivanju gubitaka već i u smanjenju troškova poslovanja. Pritom se metode studija rada mogu primijeniti ne samo u proizvodnji i radnim mjestima neposrednih izvršilaca, već i u svim djelatnostima kao i na radnim mjestima posrednih izvršilaca rada. Nastoji li se problem povećanja proizvodnosti i smanjivanja troškova, uz optimalnu kvalitetu i humaniji način rada, rješavati boljom organizacijom i promišljenijim radom koristeći vlastita sredstva, onda će studija rada mnogo pomoći. U protivnom, stvorit će se baza velike količine neobrađenih podataka koje je potrebno arhivirati.

Metode studije rada pružaju mogućnost analize svakog rada, kao i čitave proizvodnje, a poslije analize daju i mogućnosti za poboljšanje postojećeg načina rada te određivanje optimalnog vremena izrade, koje je temelj za ispravno izračunavanje normativa rada [5].

Iz sheme studija rada (Slika 1) može se vidjeti da je za ostvarenje zadataka, ciljeva i svrhe studija rada potrebno obuhvatiti studij i analizu vremena kao i pojednostavljenje rada. Cilj provođenja studija i analize vremena jest da se znanstvenim metodama utvrdi, analizira i izračuna vrijeme izrade i normativ rada koji služe kao organizacijsko mjerilo. Pojednostavljenje rada ili racionalizacija rada ima za cilj da se analizom utvrdi odvijanje rada, tj. tehnološkog procesa kako bi se radno mjesto i uvjeti rada optimalno oblikovali te bili prilagođeni ergonomiji provođenja procesa.



Slika 1. Shema studija rada (oblikovano prema [5])

Glavni doprinos studija rada leži u racionalizaciji organiziranja rada na radnom mjestu i određivanju realnih vremenskih normativa, a sve s ciljem povećanja proizvodnosti rada i smanjenjem troškova uz naglasak na ergonomiji rada radnika te smanjenju njegova zamora uz istovremeno povećanje sigurnosti rada. Važno je napomenuti da se tek na optimalno oblikovanom radnom mjestu mogu dobiti realni vremenski normativi.

2.1. Sastavni elementi vremena rada

Ukupno vrijeme rada koje je potrebno da se izvede neki posao zadanim radnim nalogom sastoji se od slijedećih elemenata [5]:

- pripremno-završno vrijeme (potrebno je za pripremanje radnog mjesta za neki posao te uređenje tog mjesta nakon rada),

- tehnološko vrijeme (označava ono vrijeme koje je potrebno za izvršavanje nekog efektivnog rada, bez obzira obavlja li se rad ručno ili strojem),
- pomoćno vrijeme (ono vrijeme koje je potrebno za obavljanje pomoćnih poslova koji omogućavaju izvođenje tehnoloških),
- dodatno vrijeme (služi za kompenzaciju onih gubitaka vremena koje ima radnik tijekom dana, a nije ih sam prouzročio).

Navedeni elementi vremena rada nalaze se u svakom tehnološkom i radnom procesu te se iskazuju u postotcima vremena izrade. Budući da postoje razni uzroci opravdanih gubitaka u radu koji se moraju obuhvatiti normativom, oni se pomoću stalnih i promjenjivih koeficijenata iskazuju unutar elementa „dodatno vrijeme“.

Koeficijent zamora i koeficijent djelovanja okoline nazivaju se stalnim koeficijentima jer isključivo ovise o vrsti rada i okolini u kojoj se taj rad obavlja te o utrošku energije ljudskog organizma za dotični posao. S druge strane, promjenjivim se označava dopunski koeficijent (dopunski koeficijent za propisani odmor, fiziološke potrebe i organizacijske gubitke) koji se za svako radno mjesto i radni proces mora posebno odrediti i periodički kontrolirati.

Procjena zalaganja jest važan element koji je potrebno promatrati i ocijeniti prilikom ručnog ili strojno-ručnog rada. Iako su se različiti analitičari vremena tijekom povijesti bavili zalaganjem radnika i procjenom zalaganja, generalno se razlozi potrebe za primjenom procjene zalaganja prilikom snimanja vremena mogu oblikovati na slijedeći način:

- dva radnika nikada ne mogu izvoditi rad jednakom brzinom bez međusobnog usklađivanja;
- potrebno je otkloniti utjecaj radnikove promjene zalaganja nastao za vrijeme snimanja vremena.

Može se postaviti pitanje treba li snimati vrijeme rada bržeg ili sporijeg radnika, tj. koje od njihovih izmjerenih vremena rada uzeti kao osnovicu za izračunavanje normativa vremena promatranog radnog procesa.

2.2. Načini određivanja vremena izrade

Kroz povijest su se razvijali brojni načini određivanja vremena izrade, odnosno rada [5, 6, 7], od kojih svaki ima svoje prednosti i mane bez obzira primjenjuje li se u određivanju vremena ručnog, strojno-ručnog ili strojnog rada. Stoga je preporučljivo da se pri donošenju odluke o izboru načina određivanje vremena izrade odabratu onaj način koji je najekonomičniji.

Općenito, načini određivanja vremena izrade mogu se podijeliti na procjenu, snimanje, izraze za strojni rad te sisteme unaprijed određenih vremena. Od navedenih načina, najstarija, najpoznatija i najraširenija metoda određivanja vremena izrade po sastavnim elementima vremena je snimanje vremena kronometrom. Zbog svoje se praktičnosti i danas često koristi na gradilištima prilikom praćenja i kontrole izvršavanja građevinskih projekata.

3. Metodologija provođenja istraživanja

Provedeno istraživanje može se podijeliti na dva dijela: istraživanje za stolom te istraživanje na terenu. Početak istraživanja započinje definiranjem predmeta istraživanja kojim se stvaraju preduvjeti za provođenje teorijskih i terenskih istraživanja. Nakon definiranja tehnološkog procesa koji se namjerava pratiti, snimati i analizirati, potrebno je odabrati metodu snimanja te prikupljene podatke statistički obraditi (proces prikazan u poglavlju 3.1) kako bi se utvrdio normativ strojnog rada. Na temelju prikupljenih podataka o uvjetima na lokaciji proračunava se normativ strojnog rada putem postojećih normiranih tablica. Dobiveni rezultati dvaju pristupa se uspoređuju te analiziraju kako bi se utvrdilo odstupanje između dviju metodologija proračuna strojnih učinaka.

3.1. Metode snimanja pomoću kronometra

Metoda snimanja vremena kronometrom ili metoda kronometraže se, uz sami mjerni instrument (kronometar, tj. štoperica), u svojoj osnovi oslanja na matematičku statistiku i teoriju vjerojatnosti. Kod ove metode snimanja snima se koristan rad prethodno definiranog radnog procesa koji je podijeljen na radne operacije.

U graditeljstvu ova metoda se najčešće primjenjuje kod snimanja kratkih cikličkih procesa koji se na gradilištima u pravilu javljaju kod standardnih građevinskih strojeva (npr. bagera, dozera, utovarivača, skrejpera, grejdera, valjaka) te transportnih sredstava, poput vozila i dizala.

Pritom su razvijene dvije metode snimanja pomoću kronometra [5, 15]:

- protočna metoda očitavanja vremena – tijekom mjerenja radnog procesa se neprekidno očitava stanje na kronometru,
- povratna metoda očitavanja vremena – tijekom mjerenja radnog procesa stanje na kronometru se bilježi i resetira nakon svake radne operacije.

Budući da se prilikom snimanja radnog procesa unaprijed ne poznaje vrijeme trajanja ciklusa ili slučajna varijabla X osnovnog skupa, uobičajeno je da se provodi snimanje radnih vremena koje radnik ili stroj utroši za obavljanje pojedinačnih radnih operacija u proizvodnom tehnološkom procesu. Stoga se slučajna varijabla pokorava normalnoj razdiobi te je potrebno utvrditi intervalnu procjenu očekivanja.

Izetbegović i Žerjav [16] navode kako se u stvarnoj primjeni u građevinarstvu u izrazima za intervalne procjene očekivanja umjesto procjene standardne devijacije aritmetičke sredine uzorka preporuča koristiti standardna greška uzorka pomoću izraza:

- za veliki uzorak ($n \geq 31$):

$$\bar{X}_n - u * s_n < \mu < \bar{X}_n + u * s_n, \quad (1)$$

- za mali uzorak ($n < 31$):

$$\bar{X}_n - t_o * s_n < \mu < \bar{X}_n + t_o * s_n, \quad (2)$$

gdje se standardna greška snimljenog uzorka izračunava preko izraza:

$$s_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2}{n-1}}. \quad (3)$$

Neposrednim izračunom u obrascu metode kronometraže najprije se izračuna snimljeni normativ vremenskog trajanja radnog procesa (N_{VS}) prema izrazu:

$$N_{VS} = \sum_{j=1}^m (\bar{X}_n * k_{pZ}), \quad (4)$$

gdje su:

\bar{X}_n prosječno vrijeme radne operacije i (1, 2, ... n),

m ukupni broj zahvata u radnom ciklusu, a

k_{pZ} koeficijent zalaganja izvršitelja.

Budući da se metodom kronometraže snimanje vrši u relativno kratkom vremenu u odnosu na vremensko trajanje cijele radne smjene, stvarni normativ vremena (N_V) dobit će se tek nakon što se snimljeni normativ korigira uz pomoć ukupnog dodatnog koeficijenta vremena [16]:

$$N_V = N_{VS} * K_D, \quad (5)$$

Ukupni dodatni koeficijent vremena dobije se prema izrazu:

$$K_D = 1 + k_a * k_n + k_d. \quad (6)$$

Pritom se koeficijent djelovanja okoline (k_a) i koeficijent zamora (k_n) mogu iščitati iz tablica [5], dok se dopunski koeficijent (k_d) izračunava preko elemenata vremena rada (t_p – pripremno-završno vrijeme u radnoj smjeni, t_N – planirani tehnološki zastoji u radnoj smjeni i t_E – fiziološke potrebe i kratki odmori u radnoj smjeni) iz izraza:

$$k_d = (t_p * t_N + t_E) / 100. \quad (7)$$

Provođenjem navedeno postupka dobiva se stvarni normativ vremena rada promatranog stroja tijekom definiranog radnog procesa koji je u recipročnom odnosu s učinkom istog.

4. Rezultati i diskusija

4.1. Uvjeti na lokaciji i definiranje tehnološkog procesa

Terenska mjerenja [17] strojnog učinka (tehnološki, tj. radni proces utovara iskopanog materijala bagerom u transportno sredstvo) napravljena su na gradilištu KBC Sušak u Rijeci u periodu od 18.4. do 13.6.2017. godine. Za snimanje je odabran bager gusjeničar CAT 330F opremljen dubinskom lopatom zapremine $1,75 \text{ m}^3$ kojim je minirani materijal (pretežno IV kategorija) utovarivan u transportna sredstva. Tijekom snimanja kronometrom korištena je i vizualna metoda kojom je, uzimajući u obzir rastresitost materijala ($k_r=1,35$), procjenjivana ispunjenost dubinske lopate pri zahvatu materijala [17].

Promatrani radni proces je podijeljen na četiri radne operacije (Tablica 1). Svaka pojedina radna operacija mjerila se povratnom metodom kronometraže s ciljem dobivanja stvarnog normativa vremena radnog procesa „utovar iskopanog materijala bagerom u transportno sredstvo“.

Tablica 1. Podjela promatranog radnog procesa na radne operacije

R. br.	Naziv radne operacije	Oznaka
1.	Zahvat materijala dubinskom lopatom bagera	01
2.	Rotacija ruke bagera u položaj iznad transportnog sredstva	02
3.	Ispuštanje materijala iz dubinske lopate bagera u transportno sredstvo	03
4.	Rotacija ruke bagera u početni položaj i priprema za ponovni zahvat materijala	04

Prilikom promatranog radnog procesa rotacija ruke bagera u radnim operacijama O2 i O4 iznosi 180°.

4.2. Rezultati terenskih mjerenja i izrada normativa

Ukupno je izmjereno 665 radnih operacija navedenog radnog procesa podijeljenih između 159 potpunih radnih ciklusa i 14 djelomičnih. Pod potpunim radnim ciklusom podrazumijeva se radni proces (RP) utovara iskopanog materijala bagerom u transportno sredstvo kod kojeg su izmjerene vrijednosti svih prethodno utvrđenih radnih operacija (O1-O4), dok se pod djelomičnim radnim ciklusom podrazumijeva tehnološki proces bez snimljene radne operacije O1. U daljnju statističku obradu uključeni su isključivo potpuno snimljeni radni ciklusi.

U Tablici 2 prikazani su statistički podaci provedenih mjerenja tehnološkog procesa te prikaz izračuna snimljenog vremenskog trajanja radnog ciklusa.

Tablica 2. Statistika provedenih terenskih mjerenja

RP	x_{\max}	x_{\min}	Σx (sec)	Σx (%)	\bar{x}	kpz	N_{vs}
O1	21,00	1,80	1.138,50	28,81	7,16	1,02	7,30
O2	15,40	1,50	873,10	22,09	5,49	1,00	5,49
O3	18,00	2,70	767,10	19,41	4,82	1,00	4,82
O4	62,90	2,10	1.173,20	29,69	7,37	0,97	7,15
Σ			3.951,90		24,84		24,76

Dobiveni normativ snimljenog vremenskog trajanja radnog procesa (N_{vs}) iznosi 24,76 sekundi, a potrebno ga je korigirati ukupnim dodatnim koeficijenom vremena prema izrazu (6), dok se pritom iz tablice [5], sukladno uvjetima snimanog tehnološkog procesa, može uzeti vrijednost 2,035 za koeficijent K_D .

Uvođenjem svih navedenih vrijednosti u izraz (5) izračun stvarnog normativa vremena (N_v) iznosi 50,3866 sekundi. Navedeno vrijeme predstavlja stvarni normativ vremena po jednom ciklusu rada, tj. radnom procesu, što u satima predstavlja ukupno vrijeme od 0,0140 h/ciklusu.

Kontinuiranim promatranjem rada strojara uvidio se problem ujednačenog ispunjenja lopate prilikom radne operacije O1. Unatoč njegovom dobrom zalaganju pri radu (opisano koeficijentom zalaganja u Tablici 2), tijekom svakog radnog ciklusa ne izvrši se utovar jednake

količine materijala u transportno sredstvo zato što se količina zahvaćenog materijala u lopati razlikuje od zahvata do zahvata. Stoga se pristupilo praćenju ukupnog vremena pri utovaru jednog transportnog sredstva i procjeni ispunjenosti dubinske lopate pri tom radnom procesu. Pritom je korištena metoda promatranja [18] kojom je procijenjeno da je pri radnim ciklusima dubinska lopata u prosjeku napunjena oko 75% (materijali iz iskopa razlikuju se po rastresitosti, a time i količini punjenja lopate bagera). Navedena vrijednost poslužila je za korekciju zapremine, tj. za preciznije oblikovanje stvarnog normativa vremena.

Ovim pristupom se utvrdilo da je prosječno pri svakom ciklusu utovareno 1,3125 m³ materijala, što znači da stvarni normativ vremena (N_v) promatranog rada bagera pri utovaru iskopanog materijala u transportno sredstvo na predmetnom gradilištu iznosi 0,0184 h/m³.

4.3. Rezultati proračuna normativa putem normiranih vrijednosti

Proračun praktičnog učinka bagera izrađen je na temelju već opisanih informacija (vidi poglavlje 4.1) koje su poslužile za izbor koeficijenata iz normiranih tablica [9-12]. Poznato je da se praktični učinak (U_p) građevinskog stroja proračunava na način da se njegov teoretski učinak (kvocijent zapremine radnog tijela stroja i vremena jediničnog radnog ciklusa) pomnoži s koeficijentom redukcije (redukcijski koeficijent materijala, uvjeta rada i organizacije rada) prema izrazu:

$$U_p = \frac{q \cdot T}{t_c} * k_R, \quad (8)$$

dok se koeficijent redukcije izračunava prema izrazu:

$$k_R = k_A * k_B * k_C. \quad (9)$$

Također, iz navedenih normiranih tablica za rotaciju ruke bagera od 180° odabrano je vrijeme jediničnog radnog ciklusa od 25 sekunde. Linarić [9, 19] navodi da bi navedene normirane tablice trebalo preispitati zbog starosti podataka te predlaže da se koriste vrijednosti radnog ciklusa iz priručnika tvrtke Caterpillar (noviji strojevi). Prema tom priručniku, odabrano vrijeme jediničnog radnog ciklusa iznosi 20 sekundi te je napravljen kontrolni proračun, dok su u Tablici 3 prikazane odabrane vrijednosti koeficijenata redukcije te njihovi nazivi.

Tablica 3. Koeficijenti redukcije teoretskog učinka

Naziv koeficijenta redukcije	Vrijednost [-]
k_A – koeficijent materijala	$= k_p * k_r * k_{vm}$
k_p – koeficijent punjenja lopate bagera	1,00
k_r – koeficijent rastresitosti materijala	0,74
k_{vm} – koeficijent vlažnosti materijala	0,95
k_B – koeficijent uvjeta rada	$= k_{rp} * k_o * k_u$
k_{rp} – koeficijent radnog prostora	1,00
k_o – koeficijent okretanja ruke bagera	0,71
k_u – koeficijent utovara	0,90
k_C – koeficijent organizacije rada	$= k_{og} * k_{rv} * k_{ds}$
k_{og} – koeficijent organizacije	0,80
k_{rv} – koeficijent radnog vremena	0,84
k_{ds} – koeficijent dotrajalosti stroja	1,00

Uvođenjem svih očitanih vrijednosti iz Tablice 3 u izraz (9), a potom zajedno sa vrijednostima teoretskog učinka u izraz (8), dobiva se vrijednost praktičnog učinka rada bagera, koja u ovom slučaju iznosi 76,07 m³/h. Odnos praktičnog učinka stroja i njegova normativa rada je recipročan te za promatrani tehnološki postupak standardnog cikličkog građevinskog stroja iznosi 0,0131 h/m³.

Uzme li se u obzir vrijeme jediničnog radnog ciklusa od 20 sekundi, tada vrijednost praktičnog učinka rada bagera iznosi 95,09 m³/h, odnosno normativ vremena rada iznosi 0,0105 h/m³. Navedeni kontrolni proračun pokazuje da odabir vremena jediničnog radnog ciklusa može značajno utjecati na izračun praktičnog učinka tijekom procesa planiranja.

4.4. Usporedba dobivenih rezultata

Normativ vremena rada bagera pri utovaru iskopanog materijala u transportno sredstvo iznosi 0,0184 h/m³, što predstavlja stvarni tj. mjereni normativ rada na predmetnom gradilištu. Ukoliko se dobiveni rezultat prikaže u obliku učinka, tada mjereni učinak dotičnog bagera iznosi 54,35 m³/h.

Za razliku od rezultata dobivenih mjerenjem i statističkom obradom, što bi predstavljao trenutak u vremenu kada je građevinski projekt već u fazi izvođenja, praktični učinak koji se računa putem normiranih vrijednosti

služi za planiranje tog istog projekta. Pritom je za poznate uvjete gradilišta izvršen proračun praktičnog učinka bagera u prethodno definiranom radnom procesu koji iznosi 76,07 m³/h. Razlika između planiranog i mjenenog učinka iznosi 21,72 m³/h. Ukoliko se rezultat dobiven mjerenjem usporedi s rezultatom praktičnog bagera s bržim jediničnim radnim ciklusom, tada razlika postaje još veća i iznosi čak 40,74 m³/h.

Navedena razlika može nastati zbog brojnih okolnosti, od onih vezanih za osobu koja promatra radni proces i provodi mjerenje, do onih vezanih za radni proces tj. strojara i gradilište. Ranijim istraživanjem [8] uočeno je postojanje razlika kod cikličkih građevinskih strojeva odnosno između njihovih učinaka dobivenih proračunom u fazi planiranja od onih dobivenih mjerenjem na terenu. Također, utvrđena je direktna zavisnost učinka bagera pri utovaru s vremenom trajanja ciklusa (za kut okreta ruke bagera od 180°). U realnim uvjetima, mogući zastoje u radu može nastati zbog utjecaja materijala, uvjeta rada kao i organizacije rada te su autori [8] identificirali da problem proizlazi iz normiranih vrijednosti koeficijentata vezanih uz organizacijske uvjete. Tijekom terenskih mjerenja radnog procesa „utovar iskopanog materijala bagerom u transportno sredstvo“ metodom kronometraže [13, 14], utvrđeno je da je mjerni učinak strojeva veći i do 30% u odnosu na planirani. Navedeni zaključak je donesen na temelju malog broja izmjerenih radnih operacija (mali uzorak, tj. $n < 31$).

Za razliku od prethodno spomenutih istraživanja, gdje su se mjerili različiti radni procesi kod različitih cikličkih građevinskih strojeva koji su se naknadno analizirali, kod ovog provedenog mjerenja mjenen je isključivo jedan radni proces za jedan kut okreta ruke bagera tijekom čitavog vremena provođenja terenskih mjerenja. Takav pristup mjerenju omogućio je osobi koja je promatrala i provodila mjerenje da bude fokusirana na radni proces u cijelosti kao i na pojedinačne radne operacije koje treba izmjeriti. Navedeno je rezultiralo bržim umjeravanjem i većom točnošću provođenja mjerenja, kao i smanjenju mogućnosti nastanka greške kod osobe koja provodi mjerenje.

Dobiveni rezultat ovog istraživanja, $U_M \leq U_P$, upućuje na to da uzrok zbog kojeg dolazi do odstupanja između planirane i izmjerene vrijednosti leži u koeficijentima redukcije (redukcijski koeficijent materijala, uvjeta rada i organizacije rada) koji se nalaze u proračunskim tablicama za izračun praktičnog učinka strojnog rada, a koje je potrebno ažurirati. Utvrđivanje točnog mjesta nastanka zastoja koji su prouzrokovali ovakvu razliku zahtijeva niz detaljnih mjerenja identičnog radnog procesa, što u ovom trenutku nije moguće napraviti zbog završetka radova. No, uočena problematika otvara potrebu za sustavnim pristupanjem i nastavkom mjerenja u budućnosti s ciljem utvrđivanja novih vrijednosti koeficijentata

redukcije i ažuriranja postojećih tablica. Tome bi trebala pripomoći upotreba senzora i bežičnih tehnologija [20], koja će zasigurno doprinijeti poboljšanju točnosti mjerenja strojnog rada na gradilištima, ali i bržem prikupljanju i obradi podataka.

5. Zaključak

U ovom radu opisana je metodologija proračuna učinaka standardnog cikličkog građevinskog stroja mjerenjem na terenu metodom kronometraže tijekom faze izvođenja radova te jedna od mogućih metodologija proračuna praktičnih učinaka koja se može primijeniti tijekom faze planiranja građevinskih radova. Istraživanjem je utvrđeno da postoje odstupanja između navedenih vrijednosti, odnosno da postoje odstupanja između normativa rada dobivenog na terenu i onog dobivenog proračunom putem normiranih vrijednosti.

Također, utvrđeno je da mjerenja radnog procesa, provedena na predmetnom gradilištu, daju manji učinak rada nego što se to može dobiti proračunom putem normiranih vrijednosti te da njihov odnos glasi $U_M < U_P$. uzroci se mogu tražiti u organizaciji rada na gradilištu (napose ljudskom faktor), provođenju mjerenja kronometražom kao i koeficijentima redukcije iz postojećih normiranih tablica.

Istraživanjem je naglašeno kako razlike između praktičnog učinka (kojim se vrši planiranje radova) i mjerenog učinka (koji se može ustanoviti tijekom izvođenja radova) postoje te je ukazano na potrebu za daljnjim kontinuiranim istraživanjem u području studija rada. Prilog tome je i činjenica da ovakve razlike mogu značajno utjecati na tijek provođenja građevinskog projekta u fazi izgradnje, kao i na ugovoreni rok gradnje. Iako je na „malim gradilištima“, tj. pri malim količinama utovara, razlika u vremenu relativno mala i zanemariva, kod „velikih gradilišta“ ona postaje velika i značajna. Štoviše, pri velikim količinama utovara razlika između planirane i stvarne vrijednosti može utjecati na projekt na takav način da planirano vrijeme izvođenja radova postane neizvedivo.

Preporuča se nastavak proučavanja i mjerenja rada na gradilištima i uvođenje bežičnih tehnologija u procese mjerenja rada s ciljem preciznog utvrđivanja mjesta nastanka zastoja i ažuriranja postojećih proračunskih tablica, što bi dovelo do usklađivanja planiranih vrijednosti sa stvarnima koje je moguće realizirati.

Zahvala. Autori se zahvaljuju tvrtki GPP Mikić d.o.o. iz Omišlja na otoku Krku na stvaranju okruženja za provođenje terenskih mjerenja u sklopu gradilišta KBC Sušak u Rijeci.

Literatura

- [1] Rukavina, J., Marović, I. (2017) *Pregled građevina bespilotnim letjelicama i daljinski upravljanim podmornicama*. U: Lakušić, S., ur. Izazovi u graditeljstvu. Zagreb: Hrvatski savez građevinskih inženjera, str. 111-128.
- [2] International Federation of Robotics. URL: <http://www.ifr.org> (23.11.2017.)
- [3] Pinter, U., Lončarić, R. (2006) *Značaj studija rada u građevinarstvu*. *Građevinar*, 58(10), str. 807-812.
- [4] Hrvatska enciklopedija. URL: <http://www.enciklopedija.hr> (15.12.2017.)
- [5] Taboršak, D. (1987) *Studij rada*. Zagreb: Tehnička knjiga.
- [6] Radujković, M. i suradnici (2015) *Organizacija građenja*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet.
- [7] Klepac, J. (1982) *Proučavanje rada u građevinarstvu*. Zagreb: Građevinski institut.
- [8] Car-Pušić, D., Husić, F., Marović, I. (2008) *Analiza učinaka standardne građevinske mehanizacije na izgradnji ceste Vodnjan-Pula*. *Zbornik radova Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci*, Vol. 11, str. 175-188.
- [9] Linarić, Z. (2007) *Leksikon strojeva i opreme za proizvodnju građevinskih materijala, Učinci za strojeve i vozila pri zemljanim radovima*. Zagreb: Business Media Croatia.
- [10] Trbojević, B. (1988) *Građevinske mašine*. Beograd: Građevinska knjiga.
- [11] Car-Pušić, D. (2016) *Nastavni materijal kolegija Organizacija i tehnologija građenja*. Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet.
- [12] Slunjski, E. (1995) *Strojevi u građevinarstvu*. Zagreb: Hrvatsko društvo građevinskih inženjera.
- [13] Marović, I., Car-Pušić, D., Završki, I. (2008) *Application of Chronometry Method towards Calculation of Regulation*. U: Radujković, M., Mlinarić, V., Izetbegović, J., Cerić, A., ur. *Proceedings of 8th International Conference on Organization, Technology and Management in Construction*. Zagreb: Croatian Association for Construction Management, str. i1-i8.
- [14] Marović, I., Žic, E., Jajac, N. (2011) *Application of Snapback Chronometry Method in Calculation of Regulation*. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. Vol. 5, broj 3, str. 273-277.
- [15] Taylor, F. W. (1947) *The Principles of Scientific Management*. New York: Harpes & Brothers.
- [16] Izetbegović, J., Žerjav, V. (2009) *Organizacija građevinske proizvodnje*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet i Hrvatska udruga za organizaciju građenja.
- [17] Berljafa, A. (2017) *Tehnologija iskopa u stijeni s mjerenjem i normiranjem rada*. Završni rad. Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet.
- [18] Lopez, Y.C. (2005) *Modeling for the Estimation of Work Duration and Management of Labor Resources for the Facilities Department at UPMR*. Magistarski rad. Mayaguez: Sveučilište Puerto Rico Mayaguez Campus.

- [19] Perišić, L. Linarić, Z. (2006) *Metodologije proračuna radnih učinaka bagera*. Mineral. Vol. 10, broj 50, str. 16-22.
- [20] Šopić, M., Vukomanović, M., Car-Pušić, D. (2017) *Planning and Control of Productivity of Construction Machinery through Use of Wireless Technology*. U: Cerić, A., Huemann, M., Radujković, M., Vukomanović, M., Završki, I., ur. Proc. of 13th International Conference on Organization, Technology and Management in Construction. Zagreb: Croatian Association for Construction Management and University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, str. 638-649.

ANALIZA TROŠKOVA KVALITETE ODABRANIH GRAĐEVINSKIH RADOVA

QUALITY COST ANALYSIS OF SELECTED CONSTRUCTION WORKS

Ksenija Tijanić*, Diana Car-Pušić*, Zlata Dolaček-Alduk**

Sažetak

Rad se bavi problematikom troškova kvalitete građevinskih radova. Ovaj se problem, osobito kod nas, do sada nije istraživao u značajnijoj mjeri. U današnje vrijeme, kvaliteta zauzima značajno mjesto u svim djelatnostima pa tako i građevinskoj. Poznato je da zadovoljenje tražene kvalitete predstavlja i jedno od bitnih mjerila uspješnosti realizacije građevinskih projekata. Naravno da postizanje kvalitete iziskuje i trošenje financijskih sredstava. Međutim, uobičajeno je da su ti troškovi sadržani u ukupnim troškovima te se njihovoj kvantifikaciji ne posvećuje posebna pažnja. Za očekivati je da će daljnjim porastom složenosti građevinskih projekata i povećanjem zahtjeva kvalitete problem kvantifikacije ovih troškova dobivati na važnosti. Kao doprinos rješavanju ovog problema provedeno je istraživanje prikupljanjem i analizom podataka o troškovima kvalitete putem anketnog upitnika među zaposlenicima građevinskih tvrtki. Istraživanjem se pokušalo utvrditi uvjetuju li trajanje i troškovi rada i materijala građevinske radne operacije iznos troškova kvalitete. Kriteriji za odabir građevinskih radova bili su učestalost pojavljivanja u projektima visokogradnje te broj radnih operacija od kojih se sastoje. Odabrano je pet radova (izrada oplate temelja, armiranje šipkastom armaturom, ugrađivanje betona C16/20, zidanje zidova opekom, žbukanje zidova), svaki sastavljen od najmanje tri radne operacije. Odabranim radovima određeni su postotni udjeli troškova kvalitete po radnim operacijama, koji su zatim uspoređeni s udjelima vremena i troškova rada i materijala. Vremenski i troškovni udjeli izračunati su pomoću normativa građevinskih radova, dok su udjeli troškova kvalitete procijenjeni na temelju podataka dobivenih anketiranjem. Rezultati su pokazali da iznos troškova kvalitete radnih operacija ispitivanih radova nije nužno proporcionalan trajanju i troškovima

*Građevinski fakultet u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka

E-mail: [ksenija.tijanic,diana.car.pusic}@gradri.uniri.hr](mailto:{ksenija.tijanic,diana.car.pusic}@gradri.uniri.hr)

**Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera, Građevinski fakultet Osijek, Vladimira Preloga 3, 31000 Osijek

E-mail: zlatad@gfos.hr

rada i materijala. Drugim riječima, mjerilo postignute kvalitete nije samo vrijeme rada uloženo u njeno dostizanje, kao ni kvaliteta ugrađenih materijala, već i kvaliteta samog rada izvršitelja. Pored toga, kad se radnoj operaciji pristupa s potrebnom pozornošću, smanjuje se i mogućnost pogreške, potreban dodatni rad, a time i dodatni troškovi za kvalitetu.

Ključne riječi: kvaliteta, građevinski rad, radna operacija, vrijeme, troškovi, troškovi kvalitete

Abstract

The paper deals with the issue of the quality cost of construction works. This problem, especially in our country, has not significantly been explored. At present, quality plays an important role in all activities, including construction. It is well known that meeting the required quality is also one of the essential benchmarks of a successful realization of construction projects. Of course, achieving quality requires spending financial resources. However, it is common that these costs are included in total costs. Thus, not enough attention is paid to their quantification. It is expected that the problem of quantification of these costs will gain more importance with further growth of construction project complexity and quality requirements. As a contribution to solving this problem, a research was conducted through a survey among the employees of construction companies by collecting data on quality costs. The research attempted to determine whether the quality cost depend on time and costs of labor and materials of construction work operation. Criteria for the selection of construction works were the frequency of appearances in building projects and the number of work operations they consisted of. Five works were selected (making formwork for foundation, reinforcing with steel rods, concreting C16/20, wall masonry, plastering of walls), each consisting of at least three work operations. Percentage shares of quality costs are determined in selected works and then compared with shares of time and costs of labor and materials. Time and cost percentage shares were calculated using the norms of construction works while the shares of the quality cost were estimated based on the data obtained by the survey. The results have shown that the amount of quality cost in construction work is not necessarily proportional to the time and cost of the work operation. In other words, the measure of the achieved quality is not merely the time of work invested in its achievement, as well as quality of embedded materials, but the quality of the work of the contractor. Additionally, when a work operation is approached with necessary care, the possibility of error, additional work, and therefore additional quality costs are also reduced.

Key words: quality, construction work, work operation, time, cost, quality cost

1. Uvod

Kvaliteta zauzima značajno mjesto u građevinskoj djelatnosti. Poznato je da, uz zadovoljavanje roka i troškova građenja, zadovoljenje tražene

kvalitete predstavlja jedno od bitnih mjerila uspješnosti realizacije građevinskih projekata. U najopćenitijem smislu, kvaliteta se može definirati kao svojstvo ili osobina koja označava određeni predmet ili pojavu i razlikuje ih od ostalih predmeta ili pojava [1]. Prema normi HRN EN ISO 9000:2015 Sustavi upravljanja kvalitetom – Temeljna načela i terminološki rječnik, kvaliteta se definira kao stupanj u kojem skup svojstvenih značajki zadovoljava zahtjeve [2].

U strukturi ukupnih troškova projekta postoji dio troškova koji se naziva troškovima kvalitete. Za upravljanje ukupnim troškovima projekta potrebno je imati svijest o postojanju troškova kvalitete kao sastavnice ukupnih troškova [3]. Točna i pouzdana procjena troškova građevinskog projekta nije moguća bez duboke analize očekivanih troškova kvalitete [4]. Istraživanja o troškovima kvalitete uglavnom se bave određivanjem udjela troškova kvalitete i ne(kvalitete) u projektima u odnosu na ukupne troškove projekta. Manji je broj istraživanja troškova kvalitete građevinskog rada (aktivnosti) i njegovih radnih operacija.

Cilj ovog rada je doprinijeti rješavanju problema kvantifikacije troškova kvalitete, odnosno utvrditi koliki su troškovi kvalitete određenih građevinskih radova i uvidjeti na koji način se troškovi kvalitete raspoređuju na radne operacije unutar građevinskog rada te u kakvom su odnosu s vremenom i troškovima rada i materijala. Građevinski radovi obrađeni u istraživanju odabrani su na temelju učestalosti pojavljivanja u projektima visokogradnje te broju radnih operacija od kojih se sastoje. Odabrano je pet radova (izrada oplata temelja, armiranje šipkastom armaturom, ugrađivanje betona C16/20, zidanje zidova opekom, žbukanje zidova), od kojih se svaki sastoji od najmanje tri, a najviše četiri radne operacije. Podaci potrebni za istraživanje prikupljeni su u građevinskim tvrtkama na području Primorsko-goranske županije metodom anketnog upitnika.

2. Pojam troška kvalitete

Troškovi kvalitete su troškovi koji nastaju pri osiguravanju zadovoljavajuće kvalitete, kao i gubici koji nastaju ukoliko tražena kvaliteta nije postignuta. Mogu se definirati kao troškovi čiji su uzroci pretežno zahtjevi kvalitete, tj. troškovi uzrokovani aktivnostima koje se odnose na sprječavanje pogrešaka, plansko ispitivanje kvalitete te interno i eksterno utvrđene pogreške [5]. Project Management Institute definira trošak kvalitete kao trošak svih nastojanja potrebnih za stjecanje kvalitete proizvoda i usluga, a ta nastojanja uključuju svaki rad potreban prema zahtjevima te preradu [6].

Troškovi kvalitete nastaju pri osiguravanju zahtjeva kvalitete, nastaju kao gubici koji se trpe kad zadovoljavajuća kvaliteta nije postignuta te ih ne bi bilo kada bi se svaki posao obavio bez pogreške prvi put [5].

Troškovi kvalitete imaju nekoliko važnih karakteristika koje ih razlikuju od drugih vrsta troškova: u pravilu su prikriveni u okviru drugih vrsta troškova sve dok ih se ne prepozna, evidentira i analizira; sadržani su u kalkulacijama, ali ne kao posebno iskazana stavka kalkulacije; potencijalna su, neiskorištena pričuva; stupanj spoznaje o njima u nekoj organizaciji mjerilo je stupnja svjesnosti o kvaliteti uopće; mogu biti značajni pokazatelj kvalitete, koristan upravi za donošenje ispravnih odluka [7].

Opća podjela troškova kvalitete prikazana je Slikom 1.



Slika 1. Podjela troškova kvalitete [5]

Troškovi za kvalitetu su ukupan iznos troškova koje je potrebno uložiti u proces poslovanja da bi se osigurao kvalitetan proizvod ili kvalitetno pružanje usluga. Mogu se podijeliti na troškove preventive i troškove ispitivanja. Troškovi preventive su troškovi koji se nameću zbog održavanja troškova propusta i ocjenjivanja na minimum. Troškovi ispitivanja su troškovi koji se javljaju u određivanju stupnja sukladnosti sa zahtjevima kvalitete. Troškove zbog (ne)kvalitete čine svi rashodi koji se javljaju zbog ispravljanja nastalih grešaka. Mogu se podijeliti na troškove unutarnjih gubitaka (manjkavosti) i troškove vanjskih gubitaka (propusta). Troškovi unutarnjih manjkavosti su troškovi kojih ne bi bilo da prije otpreme nisu postojali nedostaci u proizvodu. Troškovi vanjskih propusta su troškovi vezani uz nedostatke koji su ustanovljeni nakon što je proizvod isporučen kupcu [7].

Upravljanje troškovima kvalitete ima za cilj povećanje ulaganja u troškove za kvalitetu, a smanjenje troškove nastale zbog (ne)kvalitete. U teoriji i praksi razlikuju se dva pristupa upravljanja troškovima, tradicionalni i moderni. Tradicionalnim pristupom osiguranja kvalitete otkrivaju se greške na proizvodu koje su već nastale, a rezultiraju troškovima dorade, prerade proizvoda ili škarta proizvoda. Kvaliteta je zadovoljavajuća ako se proizvodi ne vraćaju i ako se ne primaju pritužbe [5]. Suvremeni koncept upravljanja troškovima kvalitete inzistira na

preventivnom djelovanju, što podrazumijeva da je isplativije istraživati, otkrivati i analizirati uzroke nastajanja grešaka i njihovo eliminiranje, čime troškovi kvalitete mogu biti reducirani [8].

Kako bi se troškovima moglo upravljati, treba ih pratiti i mjeriti. Brojčani podaci su potrebni za postavljanje ciljeva, utvrđivanja razlike između željenog i stvarnog, praćenje tendencija te za donošenje odluka [5].

3. Istraživanja o troškovima kvalitete

Prvu detaljniju publikaciju o troškovima kvalitete, „Total Quality Control”, izdao je Feigenbaum [9] 1956. godine. U njoj detaljno obrazlaže svoj koncept troškova kvalitete. Uvodi pojam ukupnih troškova kvalitete (engl. total quality costs) i postavlja zahtjev za kontrolom troškova dokazivanjem rezultata primjenom statističkih metoda.

U dosadašnjim istraživanjima o troškovima kvalitete u građevinskim projektima, različiti ulazni kriteriji kao što su troškovi dorade, vanjski troškovi pogrešaka, troškovi nesukladnosti, loše upravljanje materijalom na gradilištu, pretjerana uporaba materijala na gradilištu, troškovi radnog vremena utrošenog na aktivnosti koje ne dodaju vrijednost, rezultirali su i različitim rezultatima [10].

Low i Henson [11] navode da je u publikaciji od strane Odbora za građevinsku industriju (engl. Construction Industry Development Board) pod nazivom Upravljanje kvalitetom gradnje, procijenjeno da prosječni izvođač radova potroši između 5 - 10% troškova projekta radi pogrešaka u građenju te njihovog ispravljanja. Odbor je zaključio da učinkoviti sustav upravljanja kvalitetom troši oko 0,1 - 0,5% ukupnih troškova gradnje i ostvaruje uštedu od najmanje 3% ukupnih troškova projekta.

U kojoj mjeri troškovi kvalitete mogu smanjiti troškove građenja predstavljeno je u studiji građevinskih projekata u Australiji. Utvrđeno je da se troškovima prevencije troši 1% više, a troškovi neuspjeha mogu se smanjiti sa 10% troškova građenja na 2% [12].

Burati [13] je u svojoj studiji kategorizirao uzroke odstupanja troškova kvalitete u pet područja: projektiranje, građenje, izrada, transport i operabilnost, a svako područje je imalo tri vrste odstupanja: promjena, pogreška i propust. Na temelju podataka iz devet građevinskih projekata, Burati je zaključio da su troškovi odstupanja u fazi projektiranja i fazi građenja iznosili 9,5% i 2,5% ukupnog troška.

Lam [14] je u istraživanju iz 1994. godine utvrdio da troškovi kvalitete mogu činiti od 8 - 15% ukupnih troškova izgradnje građevine.

Hart [15] tvrdi da su brojne studije pokazale da se više od 25% troškova može smanjiti u većini izrađenih objekata korištenjem dobrog programa kvalitete. Također, Zambare i Dhawale [16] tvrde da se troškovi kvalitete mogu reducirati za trećinu, ako se u projektima primjenjuje efikasan sustav upravljanja kvalitetom.

Do sada je razvijeno nekoliko sustava za određivanje troškova kvalitete kao što su: Quality Performance Management System (QPMS), Quality Performance Tracking System (QPTS), Quality Cost Matrix (QCM), Project Management Quality Cost System (PROMQACS).

Ledbetter [17], koji je predložio QPMS, mjerio je troškove aktivnosti kontrole kvalitete i prerade. Nedostatak je bio što se QPMS može primijeniti samo za procjenu troškova rada. Okvirom QPMS-a Ledbetter je analizirao podatke dvanaest građevinskih projekata i utvrdio da je trošak kvalitete vezane za rad do 11,2% ukupnih troškova rada. Patterson i Ledbetter [18] također koriste QPMS za praćenje troškova kvalitete po aktivnosti na četiri projekta te su utvrdili da su troškovi kvalitete 25% troškova projekta. Iako je ovaj sustav bio jednostavan i fleksibilan, nije razmatrao učinak neuspjeha na vremenski povezane troškove. Pored toga, sustav nije identificirao specifične uzroke neuspjeha.

QPTS, ažurirana verzija QPMS-a razvijena je za karakteriziranje troškova kvalitete. Definiranjem kvalitete kao „usklađenosti sa zahtjevima“, trošak kvalitete postaje mjerljiv. QPTS se sastoji od dva glavna dijela, troškova napora za upravljanje kvalitetom i troška ispravljanja odstupanja [4].

Zambare i Dhawale [16] navode da je Abdul-Rahman prepoznao određene nedostatke QPTS sustava te razvio QCM, koji je uzimao u obzir učinak neuspjeha na vrijeme, osobito trošak ubrzavanja rada i specifičnih uzroka nesukladnosti.

Love [19] je osmislio sustav PROMQASC. Sustav PROMQACS je konstruiran na temelju standardne strukture troškova kvalitete i koristan je u prikupljanju srodnih podataka i dijeljenju podataka sa sudionicima, no ne postoji posebna metoda prikupljanja kvalitetnih podataka o građevinskim projektima.

Low i Henson [11] u svojoj publikaciji tvrde da nije dovoljno znati značenje troškova kvalitete, već ih, da bi podaci o troškovima bili korisni, treba prikupljati i mjeriti. Predložili su sustav za određivanje troškova kvalitete na gradilištu. Njihov sustav troškova je matrica dokumentacije, gdje se troškovi kvalitete izražavaju kao troškovi prevencije, procjene i neuspjeha. Predloženi troškovni model sastoji se od sedam komponenti: kod troška, obuhvaćeni posao, uzroci, problematična područja, potrošeno

vrijeme, nastali troškovi i bilješke na gradilištu. Kao najveći problem ovakvog sustava istakli su dugi vremenski period za prikupljanje potrebnih podataka.

Istraživanje provedeno u hrvatskim tvrtkama, certificiranim po modelu ISO 9001 iz 1999. godine, pokazalo je da je udio troškova kvalitete u ispitanim certificiranim tvrtkama u prosjeku 7,8% ukupnih troškova cijelog projekta. Tvrtke koje posjeduju certifikat ISO 9001 dokazuju uspješno implementiran sustav upravljanja kvalitetom u svojoj organizaciji. U ispitanim tvrtkama troškovi za kvalitetu sudjeluju sa 60%, a troškovi zbog loše kvalitete sa 40% u ukupnim troškovima kvalitete [7].

Troškove kvalitete u građevinskim projektima u Republici Hrvatskoj obradila je Dolaček-Alduk [10] te je utvrdila da prosječni ukupni troškovi kvalitete za bazu od osamnaest projekata promatranih u istraživanju iznose 1,83% ugovorene vrijednosti projekta. Troškovi za kvalitetu iznose prosječno 0,93%, nešto više od 50% ukupnih troškova kvalitete. Troškovi zbog loše kvalitete radova iznose prosječno 0,90%, nešto manje od 50% ukupnih troškova kvalitete. U okviru istraživanja predstavljen je i model upravljanja troškovima kvalitete koji podrazumijeva: identifikaciju i praćenje troškova kvalitete, reviziju aktivnosti u projektima i pregled koji provodi uprava, analizu troškova i koristi te implementaciju poboljšanja.

4. Provedeno istraživanje

U provedenom istraživanju, na pet građevinskih radova ispituje se udio troškova kvalitete za svaku pojedinu radnu operaciju unutar građevinskog rada u odnosu na vrijeme i troškove operacije, odnosno ispituje se slijede li troškovi kvalitete razdiobu troškova i vremena radne operacije. Postavljaju se sljedeća pitanja: "Jesu li kod operacije koja iziskuje najviše vremena za izvođenje i ima najveće troškove rada i materijala troškovi kvalitete ujedno i najveći?" te obrnuto, „Jesu li kod operacije koja iziskuje najmanje vremena i troškova troškovi kvalitete najmanji?"

U Tablici 1 prikazani su odabrani građevinski radovi s pripadajućim radnim operacijama.

Tablica 1. Građevinski radovi i radne operacije

Građevinski rad	Oznaka radne operacije	Radna operacija
Izrada dvostrane oplata temelja od daske debljine 24 mm	1.a.	Izrada
	1.b.	Montaža
	1.c.	Demontaža
	1.d.	Čišćenje i vađenje čavala
Ručno sječenje, ispravljanje, savijanje, postavljanje i povezivanje armature Ø12 mm, čelik B500B	2.a.	Sječenje i ispravljanje
	2.b.	Savijanje
	2.c.	Postavljanje i vezivanje
	2.d.	Prijenos
Ručno ugrađivanje betona klase C 16/20 u armirane konstrukcije srednjih presjeka, beton se spravlja na gradilištu	3.a.	Spravljanje
	3.b.	Ugrađivanje
	3.c.	Prijenos
Zidanje zidova punom opekom u produžnom cementnom mortu omjera 1:2:6	4.a.	Spravljanje morta
	4.b.	Zidanje
	4.c.	Prijenos morta
	4.d.	Prijenos opeke
Žbukanje zidova od opeke u produžnom cementnom mortu omjera 1:2:6	5.a.	Spravljanje morta
	5.b.	Grubo žbukanje
	5.c.	Fino žbukanje
	5.d.	Prijenos morta

Radovi i pripadajuće operacije, uključivši i navedeni slijed, preuzeti su iz knjige normativa građevinskih radova [20]. Pomoću normativa vremena radnika i materijala određeni su vremenski i troškovni udjeli koje radne operacije imaju pri proizvodnji jedinice proizvoda. Potrebne cijene radnika i materijala preuzete su iz Biltena Standardne kalkulacije, XII 2017 [21]. Obračunski faktor korišten u analizi cijena uzet je kao konstanta, u vrijednosti 3, koja je određena kao prosječna vrijednost.

Određivanje troškova kvalitete radnih operacija mnogo je kompleksniji posao koji bi u stvarnosti zahtijevao izradu sustava dugotrajnog praćenja i mjerenja pojedinih radova. Za potrebe ovog istraživanja podaci su prikupljeni putem anketnog upitnika koji su dostavljeni ispitanicima, zaposlenicima građevinskih izvođačkih tvrtki, direktno ili indirektno uključenih u proces građenja.

Anketni upitnik je podijeljen u dva dijela. U prvom dijelu sadrži opća pitanja o radnom iskustvu ispitanika, obrazovanju, radnom mjestu unutar poduzeća te upoznatosti s troškovima kvalitete i njihovom strukturom. Uz pretpostavku da određeni dio ispitanika neće biti upoznat s pojmom i

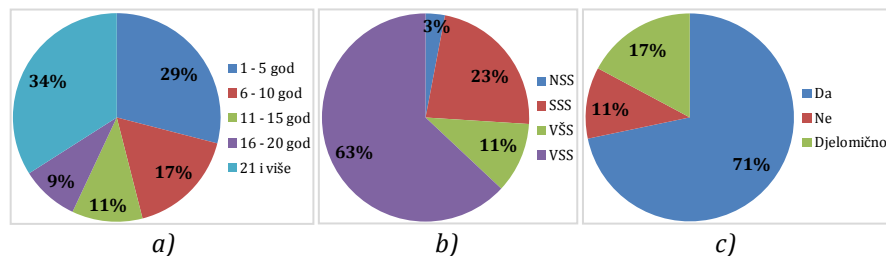
strukturu troškova kvalitete, u upitniku je dano objašnjenje tih troškova, njihovo značenje i struktura. Ispitanici su upoznati s preventivnim troškovima, troškovima ispitivanja te unutarnjim i vanjskim troškovima koji nastaju zbog (ne)kvalitete.

U drugom dijelu upitnika od ispitanika se traži da na temelju vlastitog znanja i iskustva iz struke ocijene učešće, tj. postotak troška kvalitete po pojedinim radnim operacijama u ukupnom trošku kvalitete građevinskog rada. Ispitanicima su predloženi građevinski radovi koji se ispituju, razloženi na radne operacije te se od njih traži da svakoj radnoj operaciji pridruže određeni postotak koje po njihovom mišljenju ta operacija ima u ukupnom trošku kvalitete stavke.

5. Rezultati istraživanja

Istraživanjem je obuhvaćeno 35 zaposlenika građevinskih poduzeća, uglavnom s područja Primorsko-goranske županije, čija su gradilišta na istom tom području.

Ispitanici imaju različita radna mjesta unutar poduzeća, kao što su: voditelj gradilišta, poslovođa, direktor, voditelj radne grupe, nadzorni inženjer i izrađivač ponuda. Slika 2 prikazuje strukturu radnog iskustva ispitanika (a), razinu obrazovanja ispitanika (b) te strukturu ispitanika prema upoznatosti s pojmom troška kvalitete (c).



Slika 2. Struktura: a) radno iskustvo ispitanika, b) razina obrazovanja ispitanika, c) upoznatost ispitanika s pojmom troška kvalitete

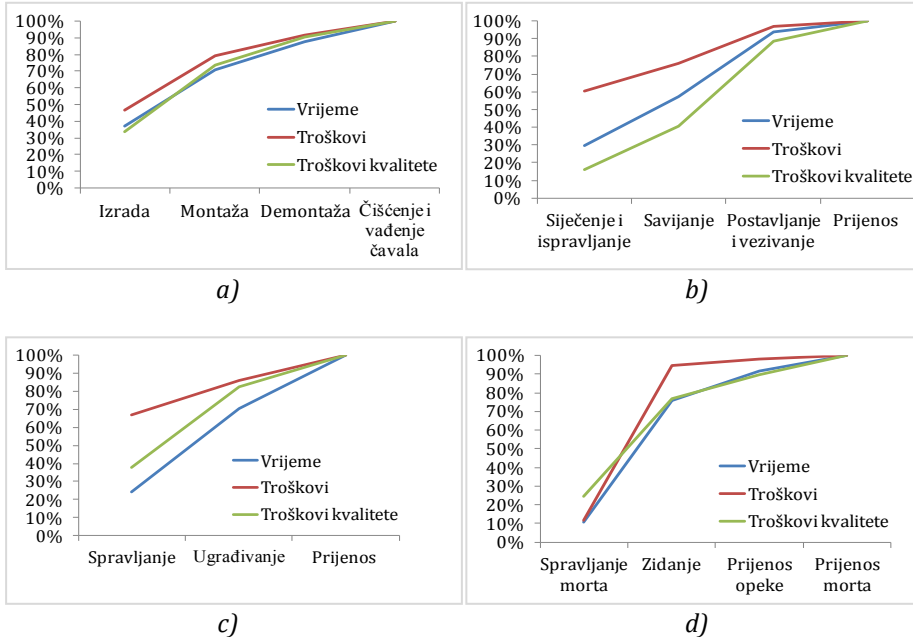
Struktura troškova kvalitete poznata je 26-orici ispitanika (74%), a ostalih 9 ispitanika (26%) nije upoznato sa strukturu troškova kvalitete.

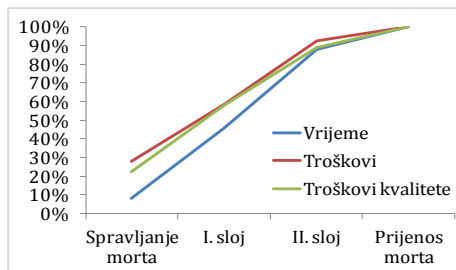
Iako su ispitanicima prije ispunjavanja ankete dana potrebna prethodna objašnjenja, treba imati na umu činjenicu da 26% ispitanika nije bilo upoznato sa strukturu troškova kvalitete. Posljedično, pri analizi dobivenih rezultata i donošenju zaključaka treba uzeti u obzir da četvrtini svih ispitanika strukturu troškova kvalitete prethodno nije bila poznata. Iako su im dane potrebne informacije, od utjecaja je i razumijevanje i

usvojeno znanje o problemu koje je vjerojatno manje nego kod ispitanika koji su od ranije upoznati s problemom ili čak imaju određena praktična iskustva. Također, budući da se istraživanje odnosi samo na Primorsko-goransku županiju i pojedine građevinske tvrtke iz tog područja, potrebno je uzeti u obzir da na razini Republike Hrvatske (a i šire) u svim regijama, pa tako i građevinskim tvrtkama, ne vladaju isti gospodarski uvjeti te se u različitim građevinskim tvrtkama problematika kvalitete tretira različito, o čemu posljedično zavise i pripadajući troškovi. Stoga rezultate ovog istraživanja treba tumačiti s obzirom na navedena ograničenja i ne donositi opće zaključke. No, uz veći broj ispitanika sa šireg područja Republike Hrvatske, a uz primjenu predloženog koncepta, dobili bi se šire primjenjivi, općenitiji zaključci.

5.1. Odnos "vrijeme-troškovi-troškovi kvalitete" radnih operacija unutar građevinskih radova

Na temelju odgovora koje su ispitanici dali u anketnom upitniku određeni su postotni udjeli troškova kvalitete radnih operacija za svaki promatrani građevinski rad. Rezultati su prikazani u obliku kumulativnih S-krivulja na Slici 3. Slika prikazuje udjele sva tri promatrana parametra građevinskog rada, dakle vrijeme, troškove i troškove kvalitete.





e)

Slika 3. Udjeli parametara radnih operacija: a) izrada oplata, b) armiranje, c) betoniranje, d) zidanje zidova, e) žbukanje zidova

Iz priloženih grafova vidljivo je da se raspodjela sva tri parametra pojedinog građevinskog rada vrši po sličnom obliku, s pripadajućim vrijednostima, slijedeći oblik S-krivulje. Kod svih radova S-krivulja troškova (rada i materijala) ima najveće postotne vrijednosti. Krivulja troškova kvalitete nalazi se između krivulja vremena i troškova, osim kod radova armiranja. Kod radova izrade oplata vidljiv je trend prirasta troškova kvalitete u vremenu koji približno prati trend ukupnog rasta troškova. To je ujedno i trend prirasta troškova po radnim operacijama. Kod armiračkih radova prirast troškova kvalitete je sporiji. Manji je prirast u početnim operacijama (sječanju i ispravljanju) te brže raste u narednim operacijama. Trend prirasta ukazuje i na učešće ovih troškova u ukupnoj strukturi. Kod betonskih radova tijekom S-krivulje troškova kvalitete ukazuje na značajnu prevagu troškova učešća prijenosa i ugrađivanja u odnosu na spravljanje betona. Slična situacija je kod zidarskih radova, s prevagom učešća prijenosa morta i opeke te zidanja u odnosu na spravljanje morta. Kod žbukanja zidova, slična je situacija kao kod tesarskih radova kad je u pitanju tijekom S-krivulje troškova kvalitete, a u strukturi troškova s prevagom izvedbe prijenosa morta i sloja fine žbuke u odnosu na spravljanje morta, špric i grubu žbuku.

U Tablici 2 prikazane su normirane vrijednosti udjela po promatranim parametrima i radnim operacijama. U tablici su crvenom (■) bojom označeni najveći udjeli promatranih parametara za svaku radnu operaciju, dok su plavom (■) označeni najmanji udjeli.

Tablica 2. Odnos parametara radnih operacija za promatrane građevinske radove

Građevinski rad	Oznaka radne operacije	Vrijeme	Troškovi	Troškovi kvalitete
Izrada dvostrane oplata temelja od daske debljine 24 mm	1.a.	1,00	1,00	0,84
	1.b.	0,90	0,70	1,00
	1.c.	0,45	0,26	0,43
	1.d.	0,33	0,18	0,24
Ručno sječenje, ispravljanje, savijanje, postavljanje i povezivanje armature Ø12 mm, čelik B500B	2.a.	0,82	1,00	0,33
	2.b.	0,76	0,26	0,51
	2.c.	1,00	0,34	1,00
	2.d.	0,18	0,05	0,23
Ručno ugrađivanje betona klase C 16/20 u armirane konstrukcije srednjih presjeka, beton se spravlja na gradilištu	3.a.	0,52	1,00	0,85
	3.b.	1,00	0,28	1,00
	3.c.	0,84	0,21	0,39
Zidanje zidova punom opekom u produžnom cementnom mortu omjera 1:2:6	4.a.	0,16	0,14	0,47
	4.b.	1,00	1,00	1,00
	4.c.	0,25	0,05	0,25
	4.d.	0,12	0,02	0,20
Žbukanje zidova od opeke u produžnom cementnom mortu omjera 1:2:6	5.a.	0,19	0,81	0,64
	5.b.	0,89	0,89	1,00
	5.c.	1,00	1,00	0,89
	5.d.	0,29	0,21	0,31

Iz rezultata je vidljivo da samo kod rada „zidanje zidova opekom“ ista radna operacija ima najveće udjele vremena, troškova i troškova kvalitete. Dakle, za operacije koje troše najviše resursa ne mora značiti da imaju najveće troškove kvalitete. Što se tiče najmanjih udjela, radovi „izrada dvostrane oplata, armiranje šipkastom armaturom i zidanje zidova opekom“ imaju najmanje udjele sva tri parametra unutar jedne radne operacije. Kod svih promatranih građevinskih radova operacija koja troši najmanje novca za rad i materijal ima i najmanje troškove kvalitete.

Iz svega navedenog vidljivo je da ne postoji jednoznačna veza između potrebnih resursa i troškova kvalitete koja bi vrijedila za sve promatrane građevinske radove u cjelini, kao ni pojedinačne radne operacije.

6. Zaključak

Građevinska industrija jedna je od temeljnih industrija svake zemlje i ima bitnu ulogu u njenom razvoju. Razvoj građevinske industrije ovisi o nizu čimbenika, a na taj razvoj utjecaj ima i kvaliteta građevinskih projekata. Općenito, kvaliteta je jedan od bitnih čimbenika za uspjeh građevinskog projekta. Bitan parameter kvalitete njezini su troškovi. Troškovi kvalitete predstavljaju sve one izdatke potrebne za ispravljanje nastalih grešaka, kao i izdatke za sprječavanje njihova nastanka. Drugim riječima, troškovi kvalitete jesu spoj troškova za kvalitetu i troškova zbog nekvalitete. Troškovi kvalitete prikriveni su u okviru drugih vrsta troškova sve dok ih se ne prepozna, evidentira i analizira. Kao i ostale vrste troškova, važno ih je pravilno planirati, pratiti i kontrolirati.

Radom je predstavljeno istraživanje u kojem se ispituju troškovi kvalitete na pet odabranih građevinskih radova. Kao rezultat istraživanja zaključeno je da ne postoji pravilo po kojem se troškovi kvalitete odabranih građevinskih radova raspoređuju na pojedinačne, sastavne radne operacije, odnosno ne ovise o udjelima vremena i troškova rada i materijala. Mjerilo postignute kvalitete nije samo vrijeme rada uloženo u njeno dostizanje, kao ni kvaliteta ugrađenih materijala, nego i kvaliteta samog rada izvođača radova. Uz to, kad se radnoj operaciji pristupa s potrebnom pozornošću, smanjuje se i mogućnost pogreške, potreban dodatni rad, a time i dodatni troškovi za kvalitetu. Svaka radna operacija treba zadovoljiti sve potrebne zahtjeve kvalitete propisane zakonom, bez obzira koliko se vremena ili financijskih sredstava na nju troši. Nepoštivanje zahtjeva kvalitete radnih operacija građevinskog rada svakako će imati negativan utjecaj na građevinu, čak i ako se ta operacija čini vremenski i troškovno manje bitnom.

Zaključno, važno je istaknuti da kvaliteta i troškovi nisu uvijek proporcionalni, odnosno da veći trošak radova neće uvijek rezultirati višom kvalitetom, ali će nepoštivanje načela kvalitete u izvedbi građevine vrlo vjerojatno rezultirati dodatnim troškovima u fazi implementacije i eksploatacije građevine.

Literatura

- [1] Funda, D. (2010) *Sustavi upravljanja kvalitetom u logistici*, Tehnički glasnik, 4 (1), 94-98.
- [2] HRN EN ISO 9000:2015 *Sustavi upravljanja kvalitetom – Temeljna načela i terminološki rječnik*.

- [3] Vinšalek Stipić, V.; Bošnjak, M. (2015) *Praćenje troškova kvalitete u poslovnim organizacijama*, Praktični menadžment – stručni časopis za teoriju i praksu menadžmenta, 6 (1), 137-140.
- [4] Tawfek, H. i ostali (2012) *Assessment of the Expected Cost of Quality (COQ) in Construction Projects in Egypt Using Artificial Neural Network Model*, HBRC Journal, 8, 132-143.
- [5] Drljača, M. (2004) *Mala enciklopedija kvalitete V - dio – Troškovi kvalitete*, Zagreb: Oscar.
- [6] PMI (2000) *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*.
- [7] Lazibat, T., Matić, B. (2000) *Troškovi kvalitete kao čimbenik povećanja konkurentnosti na domaćem i svjetskom tržištu*, Ekonomski pregled, 51 (11-12), 1334-1351.
- [8] Šunjić-Beus, M.; Martinović, D. (2007) *Upravljanje troškovima kvaliteta: Brdarević, S. Naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem "KVALITET 2007"*, Neum, Bosna i Hercegovina, 465-470.
- [9] Feigenbaum, A. (1991) *Total Quality Control*, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York.
- [10] Dolaček-Alduk, Z. i ostali (2009) *Model upravljanja troškovima kvalitete u građevinskim projektima*, Građevinar, 61 (2), 147-156.
- [11] Low, S. P.; Henson K. C. Y. (1998) *A Construction Quality Costs Quantifying System for the Building Industry*, International Journal of Quality & Reliability Management, 15 (3), 329-349.
- [12] Roberts, R. (1991) *Quality Does Not Cost – It Pays*, Australian Construction Law Report, 10 (4), 137-44.
- [13] Burati, J. L. i ostali (1992) *Causes of Quality Deviations in Design and Construction*, Journal of Construction Engineering and Management, 118 (1), 34-49.
- [14] Lam, S. W. i ostali (1994) *ISO 9000 in Construction*, McGraw-Hill, Singapur.
- [15] Hart, R.D. (1994) *Quality Handbook for the Architectural, Engineering and Construction Community*, Quality Press, Milwaukee, WI.
- [16] Zambare, P.; Dhawale, A. (2017) *Project Management Information System in Construction Industry*, International Journal of Engineering Sciences & research Technology, 6 (7), 54-60.
- [17] Ledbetter, W. B. (1994) *Quality Performance on Successful Project*, Journal of Construction Engineering and Management, 120 (1), 34-46.
- [18] Patterson, L.; Ledbetter, W. B. (1989) *The Cost of Quality: A Management Tool*, u: R.J. Bard (Ed.), *Excellence in the Construction Project*, American Society of Civil Engineers, 100–105.
- [19] Love, P. E. D. i ostali (2003) *A Project Management Quality Cost Information System for the Construction Industry*, Information and Management, 40, 649-661.

- [20] *Građevinska knjiga* (1985) Normativi i standardi rada u građevinarstvu, Visokogradnja, Knjiga 1, Knjiga 2, Beograd.
- [21] Institut IGH (2017) Bilten, Standardna kalkulacija radova u visokogradnji, XII 2017, Zagreb.

PRIMJENA NAČELA ODRŽIVE MOBILNOSTI NA UNAPRJEĐENJU PROMETNIH UVJETA MANJIH GRADOVA

APPLICATION OF SUSTAINABLE MOBILITY PRINCIPLES ON ENHANCEMENT OF TRAFFIC CONDITIONS IN SMALLER CITIES

Aleksandra Deluka-Tibljaš*, Sanja Šurdonja*, Dolores Marković*

Sažetak

Održiva mobilnost ima za cilj osiguravanje mobilnosti, prvenstveno u urbanim područjima, uz istovremeno racionalno korištenje prostora, okoliša i pozitivan utjecaj na zdravlje i općenito kvalitetu života. U ovome radu se prikazuje primjena ovoga koncepta na primjeru manjeg grada, Grada Otočca. Odabrana je uža zona centra Otočca za koju su analizirani prometno-prostorni pokazatelji te predložena rješenja kojima se uz minimalnu dodatnu izgradnju može postići unaprjeđenje prometnog sustava, što je u radu obrazloženo.

Ključne riječi: održiva mobilnost, prometni sustav, Grad Otočac

Abstract

Sustainable mobility has a goal to assure mobility, mostly in urban areas, and rationally use space and environment at the same time, not neglecting its impact and positive effects on human health and quality of life. In this paper application of this concept is presented on the example of the City of Otočac. The chosen area was the city center for which all necessary traffic and spatial analyses were done and some possible solutions for enhancing traffic conditions with minimal investments were proposed and evaluated.

Key words: sustainable mobility, traffic system, City of Otočac

*Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, Rijeka

E-mail: aleksandra.deluka_sanja.surdonja@uniri.hr, dolores.markovic@student.uniri.hr

1. Uvod

Prometni sustav jedan je od ključnih elemenata funkcioniranja i razvoja gradova i njime se uobičajeno nastoji povezati područje grada kako bi se stanovništvu osigurala mobilnost (kretanje) u svrhu zadovoljavanja određenih potreba. Prekomjerni porast motorizacije i njezin negativni utjecaj na kvalitetu života u gradovima doveo je posljednjih desetljeća do potrebe definiranje novog koncepta razvoja grada i prometa pa se danas sve više govori o osiguravanju „pristupačnosti“ umjesto „mobilnosti“ [1]. Osiguravanje pristupačnosti podrazumijeva usko povezivanje prostornog i prometnog planiranja kako bi se lociranjem određenih sadržaja smanjila potreba za mobilnošću, odnosno, kako bi stanovnici što veći dio svojih dnevnih putovanja (škola, trgovina, različite usluge) mogli obaviti na pješачko-biciklističkoj udaljenosti od mjesta stanovanja. Istovremeno, rješenje za mobilnost nije više samo izgradnja nove infrastrukture već to postaje efikasnije korištenje postojeće infrastrukture kroz učinkovitije upravljanje prijevoznom potražnjom. Pritom se prijevozna potražnja usmjerava na one prometne sustave koji imaju povoljniji utjecaj na okoliš, zdravlje i općenito kvalitetu života u gradovima (javni prijevoz, nemotorizirani vidovi prometa te druga sustavna rješenja za javni i individualni prijevoz). Sve navedeno dio je šireg koncepta osiguravanja održive mobilnosti u urbanim područjima koji za cilj ima doprinos prostornoj, energetske, ekološkoj i ekonomskoj racionalizaciji [2].

Održiva mobilnost, kao koncept, svoju operacionalizaciju doživljava kroz na razini EU formalno uspostavljene planove održive urbane mobilnosti, engl. *sustainable mobility plan* (skraćenica SUMP). Prema definiciji, plan održive urbane mobilnosti (u daljnjem tekstu POUM) u gradovima definira se kao strateški plan koji se nadovezuje na postojeću praksu u planiranju mobilnosti i uzima u obzir integracijske, participacijske i evaluacijske principe kako bi zadovoljio potrebe stanovnika gradova za mobilnošću sada i u budućnosti te osigurao bolju kvalitetu života u gradovima i njihovoj okolini [2]. Prvenstveno se planovi ove vrste izrađuju za veće gradove kod kojih koncentracija stanovništva i njihove dnevne migracije značajno utječu na opću kvalitetu života.

U ovome radu cilj je analizirati kako se načela održive mobilnosti mogu primijeniti u manjem gradu u kojem nema izraženih posljedica prekapacitiranog prometnog sustava (čekanja, zagušenja, buka...). Na primjeru primjene načela održive mobilnosti u gradu Otočcu nastoji se, na osnovu dostupnih podataka i analize prostornih i prometnih uvjeta u odabranoj zoni Otočca, zaključiti što primjena ovog koncepta može značiti te koliko i kako doprinijeti unaprjeđenju kvalitete života.

2. Plan održive mobilnosti

2.1. *Općenito o planovima održive mobilnosti*

Izrada i realizacija POUM-a u hrvatskim gradovima u skladu je s prometnom politikom Europske Unije koja je 2009. godine objavila akcijski plan urbane mobilnosti. Usvojena je i Europska strategija 2020 po kojoj gradovi bez obzira na broj stanovnika imaju ključnu ulogu u izradi i realizaciji POUM-a jer je gradski promet najznačajniji potrošač energije i uzrok emisije stakleničkih plinova [2]. POUM predstavlja inovativni način planiranja gradskog prometa koji na održivi način zadovoljava ponajprije potrebe ljudi i stavlja naglasak na uključivanje i sudjelovanje građana i ostalih sudionika u prometnom planiranju. POUM planira usklađivanje odluka u sektorima prometa, prostornog planiranja, gospodarskog razvoja, društvene djelatnosti, sektoru zdravstva, energetike, sigurnosti itd. Planovi održive mobilnosti pored uključivanja svih resursa moraju uključivati sve oblike i načine prijevoza u gradu, javni i privatni, putnički i robni, motorizirani i nemotorizirani. Veliku ulogu u Planovima mobilnosti ima parkiranje jer uređenje mjesta i pravila upravljanja parkirnim mjestima i ponuda parkirnih mjesta ima veliki utjecaj na korištenje osobnog ili javnog prijevoza [3].

Cilj planova održive mobilnosti u gradovima je stvaranje održivog prometnog sustava pomoću: osiguravanja dostupnosti poslova i usluga svima, poboljšanja sigurnosti i zaštite, smanjenja zagađenja, emisije stakleničkih plinova i potrošnje energije, povećanja učinkovitosti i ekonomičnosti u transportu osoba i roba i povećanja atraktivnosti i kvalitete gradskog okoliša [4].

Osnovne karakteristike POUM-a su sljedeće:

- jasna vizija, svrha i mjerljivi ciljevi
- održivost koja će uravnotežiti ekonomski razvoj, društvenu pravednost i kvalitetu okoliša
- integrirani pristup - koji uzima u obzir praksu i politike različitih sektora i razina uprave
- revizija transportnih troškova i koristi - uzimajući u obzir ukupne društvene troškove i koristi
- participacijski pristup - koji uključuje građane i sudionike od početka do kraja procesa planiranja [2].

Regulacija i organizacija prometa ovisi o postojećem stanju u urbanoj sredini. Prema kriterijima POUM-a moguće su različite varijante i rješenja. Prva varijanta je uobičajeno ona bez većih građevinskih zahvata i bez većih

financijskih ulaganja, a temelji se na postojećoj infrastrukturi i već planiranim prometnim projektima. Moguće su i puno složenije varijante koje uključuju izradu novih projekata i izgradnju nove prometne infrastrukture.

2.2. Plan održive mobilnosti za Otočac

Grad Otočac svoj budući razvoj temelji na razvoju turizma i prerađivačkih industrija. U Strategiji Grada Otočca, kao jedan od tri glavna cilja za razdoblje 2014.-2018. [5] navodi se “održivo upravljanje prirodnim resursima i zaštita okoliša s naglaskom na racionalno gospodarenje prostorom”, dok se unutar ovoga cilja strategije kao mjera ističe “poticanje ispravnog odabira energenata, sirovina, procesa, transportnih i prometnih sredstava i primjena suvremenih metoda kako bi se smanjio utjecaj na zrak, tlo i vode.”

Primjena načela održive mobilnosti u Otočcu ne garantira ostvarenje svih potencijalnih ciljeva održive mobilnosti, ali je određenim manjim intervencijama u prometnom sustavu grada moguće ostvariti unaprjeđenje sustava koje će doprinijeti kvaliteti prometne usluge i kvaliteti života građana i posjetitelja Otočca te ujedno doprinijeti zacrtanim ciljevima razvoja grada povezanim sa prometnim sustavom, turizmom i očuvanjem okoliša.

U ovome radu je kao područje obuhvata definirano uže područje centra Grada Otočca gdje se, procijenjeno je, zbog koncentracije stanovništva i aktivnosti, mogu postići i najveći efekti ovoga načina planiranja.

Izrada prijedloga unaprjeđenja prometnih uvjeta u odabranoj zoni kao prvu fazu pretpostavlja prikupljanje podataka o postojećem prometnom sustavu, odnosno bitne pokazatelje za sve postojeće vidove prometa kao i analizu prostora kroz analizu namjene površine te općenito kretanja i navika stanovništva. Osim šireg prostorno-prometnog položaja i namjene površine u zoni obuhvata, analizirani su uvjeti odvijanja pješačkog i biciklističkog prometa, parkiranje, prometna opterećenja i kapaciteti postojećih raskrižja kao i prometno-sigurnosni uvjeti na istima te pristupačnost infrastrukture za sve kategorije stanovnika.

S obzirom na dostupnost podataka o postojećem stanju u prometu definirani su konkretni ciljevi plana održive mobilnosti kao i mjerljivi pokazatelji istog, Tablica 1.

Tablica 1. Ciljevi plana održive mobilnosti te načini mjerenja ciljeva

Cilj	Način mjerenja postignutog cilja
Unaprjeđenje uvjeta za biciklistički promet	Duljina biciklističkih putova odvojenih od motornog prometa
Unaprjeđenje pješačkog prometa	Duljina novih ili proširenih pješačkih putova
Uklanjanje dužuličnih parkirnih mjesta (sa ciljem osiguravanje bolje preglednosti na raskrižjima)	Broj dužuličnih parkirnih mjesta koja su zamijenjena parkirnim mjestima na izvanuličnim parkiralištima
Osiguravanje kretanja svim kategorijama stanovništva	Broj pješačkih prijelaza prilagođenih kretanju osoba slabije pokretljivosti

3. Analiza postojećih prometnih uvjeta u području obuhvata

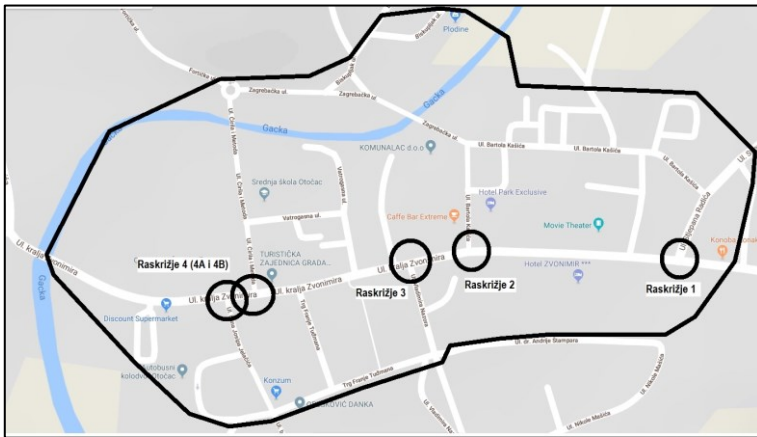
3.1. Opći podaci o području obuhvata

Grad Otočac smješten je u Ličko-senjskoj županiji, u zapadnom dijelu Gackoga polja na 459 m.n.m. Područje Grada Otočca površine je 565,3 km². Dimenzije prostora Grada pružaju se prosječnom dužinom u smjeru istok – zapad od 20 – 32 kilometra, te prosječnom širinom u smjeru sjever – jug 23 – 32 kilometra [6].

Grad Otočac ima izuzetno dobar prometni položaj jer je smješten na trasi državne ceste D-50 (Ulica Kralja Zvonimira) koja povezuje središnju Hrvatsku s obalnim područjem. Izgradnjom autoceste A1 Zagreb-Split, grad je ostvario dobru prometnu povezanost s većim gradskim središtima. Područjem Grada Otočca prema podacima iz "Odluke o razvrstavanju javnih cesta" (NN br. 66/2013) prolazi 248,14 km javnih (razvrstanih) cesta , od toga 33,83 km autocesta (A1), 39,25 km državne ceste (D50 i D52), 86,10 km županijske ceste (ŽC) i 88,96 km lokalnih cesta (LC). [7]

Grad Otočac sastoji se od 22 naselja. Prema popisu stanovništva iz 2011. godine na području grada živi 9.778 stanovnika, (od čega u samom Otočcu 4.240). Gustoća naseljenosti u Otočcu je 17 stanovnika na km². Prema navedenom popisu iz 2011. godine u Gradu je živjelo 19% stanovnika dobne skupine od 0-19 godina, 51% stanovnika u dobnoj skupini od 20-59 godina i čak 30% starosna grupa preko 60 godina, što je iznad kritične granice udjela starog stanovništva od 12% [6]. Najbrojnija je dobna skupina od 20-59 godina pa se sa sigurnošću može pretpostaviti da su pripadnici te skupine ujedno i aktivni sudionici u prometu kao vozači motornih vozila, dok drugu polovicu stanovništva čine ugrožene skupine: djeca i staro stanovništvo.

Područje obuhvata u ovome radu je samo središte grada Otočca; kroz cijelu zonu obuhvata proteže se glavna ulica, Ulica kralja Zvonimira (Slika 1). U zoni su locirani svi bitni gradski sadržaji trgovačkog, turističkog, administrativnog, obrazovnog i sportsko-rekreativnog karaktera, stambena namjena dominira u Ulici Bartola Kašića, od križanja sa Ulicom kralja Zvonimira do križanja sa Ulicom Stjepana Radića.



Slika 1. Zona obuhvata sa oznakama analiziranih raskrižja

3.2. Analiza postojećih prometnih uvjeta

U zoni obuhvata detaljno je analizirana cestovna mreža, značajnija raskrižja u centru (4 raskrižja), parkiranje (ulično i vanulično) te pješačke i biciklističke staze. Detaljna analiza i dodatni grafički prilozi dostupni su u diplomskome radu na kojem se ovaj rad temelji [8].

3.2.1. Cestovna mreža i raskrižja u zoni obuhvata

Prema kategorizaciji Hrvatskih cesta, kroz zonu prolazi državna cesta DC 50 (Ulica kralja Zvonimira), županijska cesta ŽC 5128 (Ulicu Stjepana Radića) i ŽC 5143 (Ulicu bana Josipa Jelačića). Ostale ceste su lokalnog i nerazvrstanog karaktera. U ovom su radu analizirana četiri raskrižja na državnoj cesti D50 (Slika 1):

1. Raskrižje Ulice Stjepana Radića i Ulice kralja Zvonimira (raskrižje 1)
2. Raskrižje Ulice Bartola Kašića i Ulice kralja Zvonimira (raskrižje 2)
3. Raskrižje Ulice Vladimira Nazora i Ulice kralja Zvonimira (raskrižje 3)
4. Raskrižje Ulica Ćirila i Metoda – Ulica kralja Zvonimira – Ulica bana Josipa Jelačića (raskrižje 4A i 4B).

Za svako raskrižje provedena je analiza postojećeg stanja koja je obuhvaćala brojanje prometa na raskrižju u vršnom satu, mjerenje trajanja ciklusa semafora (na raskrižjima 1 i 4B), analizu preglednosti na raskrižju, analizu broja potencijalnih kolizijskih točaka te analizu razine uslužnosti na raskrižju.

Brojanje prometa na svakom raskrižju provedeno je u jutarnjem i popodnevnom vršnom satu, a kao mjerodavni usvojen je jutarnji vršni sat (7:00 -8:00). Vozila su podijeljena u 4 kategorije: osobna vozila, teretna vozila, autobusi te motocikli. U Tablici 2 prikazano je prometno opterećenje izraženo putničkim automobilskim jedinicama (PAJ), a za homogenizaciju su korišteni slijedeći koeficijenti: 1 za osobna vozila, 1.5 za autobuse i teretna vozila te 0.5 za motocikle. Na oba semaforizirana raskrižja (1 i 4) mjerenjem je utvrđen ciklus semafora u trajanju 60 s u 2 faze. Analiza preglednosti provedena je prema Američkim smjernicama za projektiranje cesta, tzv. Greenbook, jer iste uključuju veći broj parametara te je proračunata duljina preglednosti preciznije određena nego postojećom hrvatskom normom [9]. Na situacionim nacrtima, na temelju definiranih dozvoljenih smjerova kretanja te broja prometnih traka, određene su kolizijske točke. Količina vozila i ciklusi semafora (u slučaju semaforiziranih raskrižja) ulazni su parametri na temelju kojih je određena razina uslužnosti raskrižja pomoću softvera SIDRA INTERSECTION 6.1. U Tablici 2 prikazani su rezultati analize postojećeg stanja za sva raskrižja.

Tablica 2. Rezultati analize postojećeg stanja raskrižja

Raskrižje	Privoz	Prometno opterećenje [PAJ]	Kolizijske točke	Preglednost na raskrižju	Razina uslužnosti
Raskrižje 1	1	273	15 voz-voz 7 voz-pješ	Zadovoljena	C
	2	451,5			A
	3	468			B /A
Raskrižje 2	1	262,5	9 voz-voz 2 voz-pješ	Na sporednom ne zadovoljava	C
	2	574,5			A
	3	458,5			A
Raskrižje 3	1	226,5	9 voz-voz 4 voz-pješ	Zadovoljena	B
	2	376			A
	3	420,5			A
Raskrižje 4A	1	522	6 voz-voz 2 voz-pješ	Zadovoljena	A
	2	169,5			A
	3	432,5			A
Raskrižje 4B	1	392	8 voz-voz 5 voz-pješ	Zadovoljena	B
	2	215			B
	3	154			C

Raskrižja 1, 2 i 3 su trokraka pravilna raskrižja, od čega su raskrižja 2 i 3 nesemaforizirana. Raskrižje 4 je netipično, dijelom semaforizirano četverokrako raskrižje, koje se za potrebe analize razine uslužnosti razmatralo kao dva trokraka raskrižja.

Rezultati analize postojećeg stanja na navedenim raskrižjima pokazuju da su raskrižja slabije prometno opterećena, što je rezultiralo vrlo dobrom razinom uslužnosti na gotovo svim privozima raskrižja (najlošija je razina C, samo u 3 slučaja).

Preglednost je zadovoljena na svim osim na sporednom privozu raskrižja 2, gdje je zbog parkiranih vozila na glavnom smjeru onemogućena dobra preglednost vozilima iz sporednog smjera.

3.2.2. Parkiranje u zoni obuhvata

U zoni obuhvata ima ukupno 654 označenih parkirnih mjesta. Najveći broj nalazi se u Ulici kralja Zvonimira u kojoj su označena 242 parkirna mjesta od kojih je veći dio (cca 60%) ulično parkiranje. Osim za osobne automobile, izgrađena su tri parkirna mjesta za autobuse. Parkirna mjesta u ovoj ulici označena su i u neposrednoj blizini pješačkih prijelaza (na nekim mjestima ta udaljenost iznosi samo 30 cm), što znatno utječe na smanjenje preglednosti prometa i predstavlja opasnost za pješake koji prelaze kolnik na označenim prijelazima. U zoni postoje dodatna izvanulična parkirališta sa cca 230 parkirnih mjesta. Parkiranje se ne naplaćuje, a uočeno je da se nepropisano parkiranje tolerira.

3.2.3. Pješačke i biciklističke staze u zoni obuhvata

Pješački promet u zoni obuhvata odvija se uređenim nogostupima. Duž Ulice Kralja Zvonimira isti su obostrani i odgovarajuće širine na cijeloj dužini (preko 4,0 m). Od kolnika su najvećim dijelom odvojeni zelenim površinama na kojima se nalazi drvored te parkirnim mjestima, što pridonosi većoj sigurnosti pješaka. Budući da su nogostupi izgrađeni i u ostalim ulicama koje su povezane s Ulicom kralja Zvonimira, pješacima je omogućena dobra povezanost s različitim sadržajima unutar zone.

U ostalim ulicama u promatranoj zoni (Vatrogasna ulica, Ulica Ćirila i Metoda) nogostupi su izgrađeni i uređeni samo djelomično i na nekim mjestima su neodgovarajuće širine (do 1,35 m).

U Zagrebačkoj ulici, nogostupi su obostrani i u većem dijelu neodgovarajuće širine. Najuža točka nalazi se na dijelu mosta preko rijeke Gacke, gdje iznosi svega 80 cm. I na mjestima na kojima su nogostupi odgovarajuće širine, zbog nepropisnog parkiranja vozila, ugrožena je sigurnost pješaka koji za kretanje koriste kolnik. U ulici su obilježena tri

pješачka prijelaza i to na kružnom toku, u blizini supermarketa te na križanju s Ulicom Bartola Kašića.

3.2.4. Zaključno o postojećim prometnim uvjetima

Na temelju provedene analize sadašnjeg stanja koja je obuhvatila analizu svih vidova prometa unutar zone obuhvata te analizu prometno-sigurnosnih uvjeta odvijanja prometa na raskrižjima može se zaključiti da su, s obzirom na manji intenzitet te izgrađene i uređene nogostupe, uvjeti odvijanja prometa u centru Otočca relativno zadovoljavajući, a u nastavku se navode i uočeni elementi kod kojih bi manjim ulaganjima ili prenamjenama prometnih površina bilo moguće unaprijediti uvjete odvijanja prometa.

Glavni uočeni prometni problem su:

- djelomično preuski nogostupi i nogostupi neprilagođeni invalidnim osobama,
- nepropisno parkiranje u pojedinim dijelovima zone,
- nedostatak parkirnih mjesta,
- pješачki prijelazi neprilagođeni invalidnim osobama,
- nepostojanje javnog prijevoza putnika (niti infrastrukture za sigurno odvijanje istog, autobusnih stajališta),
- nije osigurana zaustavna preglednost na raskrižju 2 (križanje ulica Bartola Kašića i Ulice kralja Zvonimira).

Nakon provedene analize pješачkih putova u zoni obuhvata može se zaključiti da izgrađeni nogostupi u gotovo svim ulicama omogućavaju pješacima sigurno kretanja gradskim ulicama i pristup svim sadržajima, kako u samom centru grada, tako i šire. Izuzetak je Ulica Ćirila i Metoda u kojoj nogostup nije u potpunosti izgrađen, a u većom dijelu je neodgovarajuće širine. U zoni obuhvata obilježen je ukupno 31 pješачki prijelaz na kojima je omogućeno sigurno kretanje pješaka. Isti su odgovarajuće širine, a nekolicinu (7 pješачkih prijelaza) bi trebalo prilagoditi kako bi se invalidnim osobama omogućilo nesmetano prelaženje gradskih ulica i brži dolazak do željenog cilja.

U zoni obuhvata je primijećen nedostatak parkirnih mjesta koji je najizraženiji u Ulici Bartola Kašića. Problem nepropisnog parkiranja uočen je i u Zagrebačkoj ulici. Navedeni problemi mogli bi se riješiti uređenjem novih parkirnih mjesta na prilazima stambenih zgrada.

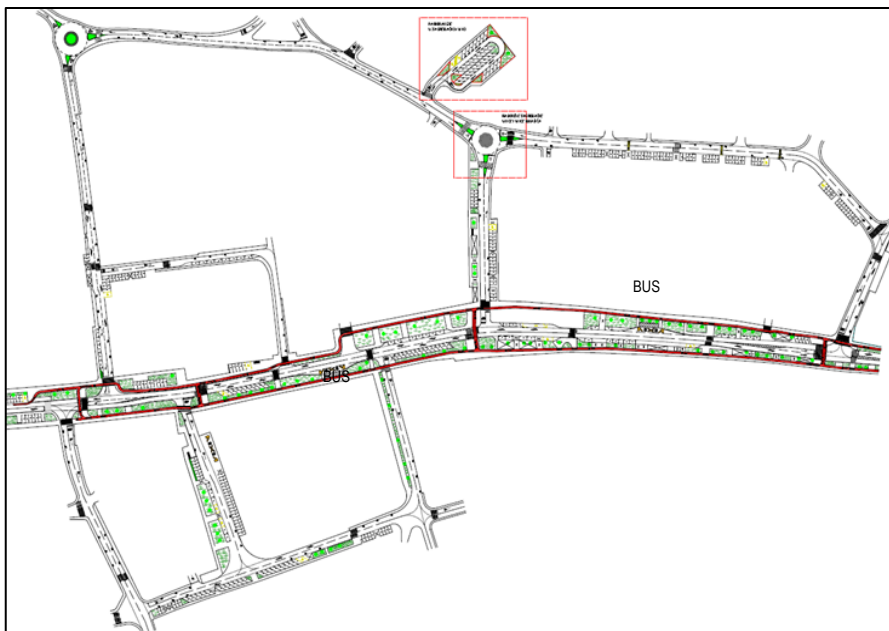
Što se tiče kapaciteta raskrižja i razine uslužnosti, vidljivo je da je prosječna razina uslužnosti na svim raskrižjima zadovoljavajuća. Nešto lošija razina uslužnosti (razina C) uočava se na privozima sa sporednih

ulica, uglavnom zbog lijevih skretanja. Preglednost kod svih analiziranih raskrižja je zadovoljavajuća osim kod raskrižja 2, i to kod lijevih i desnih skretača iz sporedne ulice, Ulice Bartola Kašića.

4. Prijedlog za unaprjeđenje prometnih uvjeta u gradu Otočcu na principima održive mobilnosti

U cilju poboljšanja prometnih uvjeta u zoni obuhvata predviđena je (Slika 2) [8]:

- izgradnja biciklističko-pješačkih staza u Ulici kralja Zvonimira i prenamjena ostalih ulica u ceste za mješoviti promet,
- izgradnja autobusnih stajališta u Ulici kralja Zvonimira,
- izgradnja parkirališta u Zagrebačkoj ulici,
- rekonstrukcija križanja Zagrebačke ulice i Ulice Bartola Kašića,
- rekonstrukcija dijela Ulice Ćirila i Metoda i Vatrogasne ulice.



Slika 2. Zona obuhvata s prikazom novog rješenja prometne infrastrukture[8]

Izgradnjom biciklističko-pješačkih staza i prenamjenom ulica u ceste za mješoviti promet poboljšali bi se uvjeti odvijanja biciklističkog prometa u zoni obuhvata i time potaklo stanovnike na učestalije korištenje bicikala u

prometu. Uvođenje javnog prijevoza i izgradnja autobusnih stajališta omogućili bi stanovništvu lakši i jednostavniji dolazak do svih sadržaja u zoni obuhvata te bi utjecalo na smanjenje motornog prometa u centru grada, a time i na smanjenje ispušnih plinova. Izgradnjom parkirališta povećali bi se kapaciteti parkirnih mjesta i vozačima bi se omogućilo parkiranje u neposrednoj blizini centra grada, što je posebno značajno za ljetne mjesece kada je promet pojačan, a sadašnji kapaciteti parkirnih mjesta nisu dostatni. Izgradnja kružnog raskrižja povećala bi sigurnost prometa na križanju kao i njegovu propusnost te bi utjecala na smirenje prometa.

Osim navedenih rješenja koja su detaljnije elaborirana u nastavku, predlaže se i prilagođavanje svih pješačkih prijelaza osobama sa invaliditetom.

4.1. Biciklističko-pješačke staze u Ulici kralja Zvonimira i prenamjena ostalih ulica u ceste za mješoviti promet

Kako bi se stvorili bolji uvjeti za odvijanje biciklističkog prometa u zoni obuhvata, planirana je izgradnja biciklističko-pješačkih staza u Ulici kralja Zvonimira i prenamjena ostalih cesta u ceste za mješoviti promet. Načela planiranja te elemente za projektiranje, izgradnju i održavanje biciklističke infrastrukture propisuje Pravilnik o biciklističkoj infrastrukturi (NN 28/2016). Istraživanja pokazuju da su sigurni biciklistički putovi najvažniji preduvjet za razvoj ovog vida prometa te se može očekivati da bi osiguravanje primjerene biciklističke infrastrukture (uz putove to je još i parkiranje za bicikle) sigurno doprinijelo povećanju udjela biciklističkog prometa u prometu Grada Otočca.

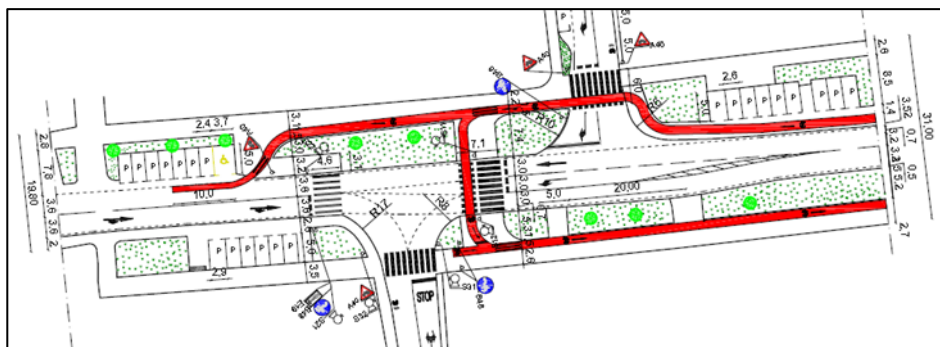
Biciklističko-pješačka staza je prometna površina namijenjena za kretanje biciklista i pješaka, izgrađena odvojeno od kolnika i označena odgovarajućom signalizacijom [10]. Biciklisti i pješaci u pravilu ne smetaju jedni drugima budući da se kreću sličnom brzinom, a biciklisti vožnju uglavnom prilagođavaju pješacima. Opasnost sudara pješaka i biciklista je neznatna u usporedbi s mogućim sudarima prilikom miješanja biciklista ili pješaka s motornim vozilima. Prednost ovakvog rješenja za bicikliste su kraći put i lakši pristup odredištima.

Analizirajući postojeću prometnu infrastrukturu u Ulici Kralja Zvonimira, na postojećim nogostupima je planirana izgradnja jednosmjernih biciklističko-pješačkih staza s obje strane ulice. Staza za bicikliste planirana je u širini od 1,5 m i od kolnika je odvojena zelenilom, osim na jednom manjem dijelu gdje je od prometnice odvojena 0,5 m zbog sigurnosti biciklista.

Prilikom izgradnje biciklističke infrastrukture posebnu pozornost treba posvetiti načinu vođenja biciklističkog prometa preko raskrižja budući da se u raskrižju odvijaju složenije prometne situacije koje direktno ugrožavaju sigurnost sudionika u prometu. Prilikom vođenja biciklista unutar raskrižja potrebno je osigurati da isti budu pravovremeno uočljivi iz svih prilaza svim sudionicima u prometu. Također treba osigurati preglednost između biciklista i drugih sudionika u prometu.

Prijelaz biciklističke staze preko raskrižja označen je uz pješački prijelaz na strani bliže centru raskrižja kvadratićima bijele boje dimenzije 0,5 m. Vođenje biciklističke staze preko privoza sporedne ceste predviđeno je izravno (Slika 3).

U ostalim ulicama u zoni obuhvata nogostupi nisu dovoljno široki da se dio širine odvoji za biciklističku stazu, a konfiguracija terena ne omogućuje njihovo proširenje i izgradnju biciklističko-pješačkih staza pa su iste prenamijenjene u ceste za mješoviti promet.



Slika 3. Vođenje biciklističke staze u zoni raskrižja [8]

Cesta za mješoviti promet je prometna površina po kojoj se zajednički odvija biciklistički i motorni promet. Na kolnicima se, u skladu s Pravilnikom o biciklističkoj infrastrukturi, postavljaju prometni znakovi i oznake kojima se vozači motornih vozila upozoravaju na pojavu biciklista u prometu.

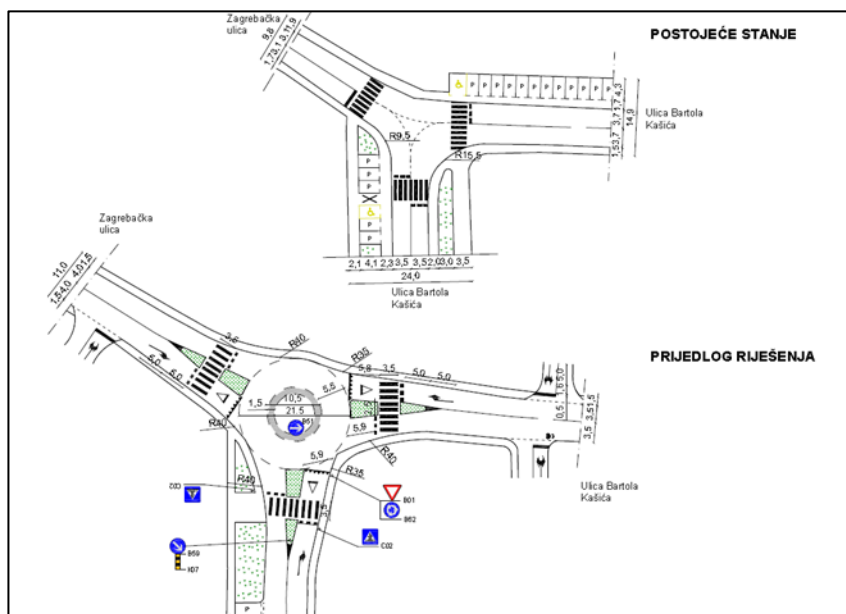
Ukupno je navedenim rješenjima predloženo da se izvede približno 950 m jednosmjernih biciklističkih staza te obilježi 9 prijelaza biciklističke staze preko kolnika, od čega 4 na glavnom prometnom smjeru u Ulici Kralja Zvonimira. Sve ostale ulice u zoni primjereno su obilježene kao ceste za mješoviti promet. Način obilježavanja prikazan je na Slici 3.

4.2. Autobusna stajališta u Ulici kralja Zvonimira

Javni gradski prijevoz omogućio bi stanovnicima grada, a naročito mlađoj i starijoj populaciji, lakšu pristupačnost gradskim sadržajima te bi utjecao na smanjenje motornog prometa u samom centru grada, a time i na smanjenje emisije štetnih plinova. Unutar zone obuhvata planirana je izgradnja dvaju autobusnih postaja na državnoj cesti DC 50 u kojoj ograničenje brzine iznosi 50 km/h. Slika 2 prikazuje položaj autobusnih postaja. Analiza pješačke dostupnosti od lokacije ovih postaja opravdava njihov položaj jer je gravitacionom zonom 5-minutnog pješaćenja (cca 400m) obuhvaćena cijela Zvonimirova ulica te priključne ceste prikazane na Slici 2. U radu nisu analizirane moguće autobusne linije.

4.3. Rekonstrukcija križanja Zagrebačke ulice i Ulice Bartola Kašića

Križanje Zagrebačke ulice i Ulice Bartola Kašića je trokrako nesemaforizirano raskrižje na kojemu se Ulica Bartola Kašića pruža jednim dijelom u smjeru istoka, a drugim u smjeru juga. Krakovi ulice odvajaju se gotovo pod pravim kutom. Vozači iz smjera Zagrebačke ulice imaju znak obaveznog zaustavljanja, tako da se moraju zaustaviti prije ulaska u raskrižje bez obzira na to odvija li se promet u Ulici Bartola Kašića ili ne.



Slika 4. Prikaz postojećeg i predloženog (kružnog) raskrižja na križanju Zagrebačke ulice i Ulice Bartola Kašića [8]

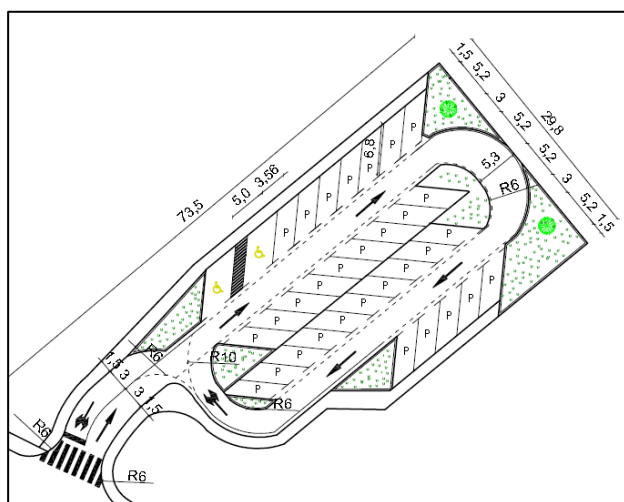
Kako bi se postigao sigurniji (manji broj kolizionih točaka) i brži prolazak vozila kroz raskrižje (nije potrebno zaustavljanje) te smanjila brzina kretanja vozila u Ulici Bartola Kašića, predviđena je izgradnja kružnog raskrižja (Slika 4).

Predviđeno je jednotračno kružno raskrižje s vanjskim promjerom od 21,5 m. Kružni prometni trak je širine 5,5 m, a središnji razdjelni otok je promjera 10,5 m s prijelaznim prstenom širine 1,5 m. Središnji otok ima prevozni dio kako bi se teretnim motornim vozilima omogućio prolazak kroz kružni tok. Na svakom od privoza su predviđeni razdjelni otoci. Biciklistički promet unutar kružnog raskrižja odvija se identično motornom prometu budući da se radi o križanju cesta za mješoviti promet. Postojeće i predloženo kružno raskrižje prikazani su na Slici 4.

4.4. Parkiranje u zoni

Predloženim rješenjem nastojao se revidirati broj dužuličnih parkirnih mjesta u glavnoj ulici, Ulici Kralja Zvonimira, čime se postigla bolja preglednost na određenim raskrižjima (ukupno 8 PM) te osigurao prostor za formiranje autobusnih postaja (ukupno 21 PM). Zbog implementacije kružnog raskrižja, na križanju Ulica Bartola Kašića i Zagrebačke ulice također je uklonjen dio parkirnih mjesta (Slika 4).

Uklonjena parkirna mjesta su nadomještena uređenjem izvanuličnog parkirališta s 33 PM (Slika 5) u Zagrebačkoj ulici, a uređena su i dužulična parkirna mjesta u Ulicama Ćirila i Metoda te Vatrogasnoj ulici, čime je ukupni broj parkirnih mjesta u zoni ostao isti, ali je sada veći dio objedinjen na posebnoj površini.



Slika 5. Parkiralište u Zagrebačkoj ulici [8]

Uz navedeno, na svim mjestima koja su dostupna osobama koja se kreću u invalidskim kolicima osigurana su rezervirana parkirna mjesta (ukupno novih 5 PM uz postojeće te 2 na izvanuličnom parkiralištu).

5. Zaključak

Prijedlog unaprjeđenja prometnih uvjeta u gradu Otočcu na principima održive urbane mobilnosti izveden je na temelju analize postojećeg prometnog sustava i načina odvijanja svih vidova prometa u zoni obuhvata. Analizi su prethodila terenska istraživanja temeljem kojih je utvrđeno postojeće stanje čitavog područja obuhvata. Nije provedena analiza prometne sigurnosti koju bi svakako bilo dobro uključiti pri izradi ove vrste planova.

Iako dostupni podaci i priroda rada na kojem se temelji ovaj članak ne omogućavaju izradu cjelovitog plana održive mobilnosti, u radu su definirani ciljevi izrade plana kao i mjerljivi pokazatelji plana. Nastojalo se da rješenja budu izvediva uz manje investicije te se ponuđena rješenja temelje uglavnom na prenamjeni postojećih površina i raskrižja unutar postojećih gabarita. Kao novi objekt predlaže se izvanulično parkiralište koje ne predstavlja veliku investiciju.

Analiza unaprijed definiranih ciljeva i pokazatelja:

Cilj	Način mjerenja postignutog cilja	POSTOJEĆE STANJE	PRIJEDLOG
Unaprjeđenje uvjeta za biciklistički promet	Duljina biciklističkih putova odvojenih od motornog prometa	0 m	950m
Unaprjeđenje pješačkog prometa	Duljina novih ili proširenih pješačkih putova	-	novih 110 m
Uklanjanje dužuličnih parkirnih mjesta u Ulici Kralja Zvonimira	Broj dužuličnih parkirnih mjesta	242 PM	210 PM
Osiguravanje kretanja svim kategorijama stanovništva	Broj pješačkih prijelaza prilagođenih kretanju osoba slabije pokretljivosti	24	31

Uz navedeno, treba napomenuti da je za jedno od raskrižja u zoni predložena rekonstrukcija u kružno raskrižje što bi doprinijelo sigurnosti odvijanja prometa, kako zbog manjeg broja potencijalnih kolizijskih točaka, tako i zbog dokazanog efekta kružnih raskrižja na smanjenje brzine u zonama raskrižja [11].

Navedene mjere mogu se procijeniti kao pozitivan doprinos održivoj mobilnosti jer su osigurani uvjeti za biciklistički promet u zoni u kojoj postoji koncentracija sadržaja (škole, sportski objekti i sl.) te bi se istima mogla koristiti djeca i mladi, što doprinosi razvijanju njihovih zdravih navika. Unaprjeđeni su i uvjeti za pješaćenje. Dio parkirnih mjesta iz Ulice Kralja Zvonimira je uklonjen, prvenstveno radi formiranja autobusnih ugibališta, a dijelom i zbog osiguravanja preglednosti na jednom od raskrižja (raskrižje 2). Autobusnim ugibalištima se osiguravaju preduvjeti za organizaciju javnog prijevoza u Otočcu, što bi sigurno povoljno utjecalo na život stanovnika okolnih naselja. Otočcu gravitiraju 22 naselja sa ukupno oko 5500 stanovnika. Povećanjem broja PM za invalidne osobe, kao i uređenjem svih pješačkih prijelaza, omogućava se lakše kretanje i ovoj skupini stanovništva. Uz navedene infrastrukturne mjere neophodno bi bilo uključivanje građana u razradu i promoviranje ponuđenih rješenja kako bi i korisnici, stanovnici Grada Otočca i okolnih naselja, lakše prepoznali dobiti prometnog sustava unaprijeđenog na načelima održive mobilnosti.

Zahvala. *Prikazani rezultati proizašli su iz potpore znanstvenim istraživanjima „Održivo projektiranje kolničkih konstrukcija u urbanom području“, koju financira Sveučilište u Rijeci.*

Literatura

- [1] Tumlin, J. (2012.). *Sustainable Transportation Planning*, „John Wiley and Sons“, Hoboken, New Jersey
- [2] Sustainable Urban Mobility Plan.
http://www.mobilityplans.eu/docs/file/SUMP_Brochure_HR_web.pdf
(8.1.2018.)
- [3] Planovi održive urbane mobilnosti.
<http://www.szz.hr/planovi-odrzive-urbane-mobilnosti%E2%80%90sump>
(9.1.2018.)
- [4] Projekt izrade plana održive mobilnosti Grada Siska.
<https://sisak.hr/wp-content/uploads/Projekt-izrade-plana-odr%C5%BEive-urbane-mobilnosti-Grada-Sisak-SUMP.pdf> (9.1.2018.)
- [5] Strategija razvoja grada Otočca 2014.-2018. <https://otocac.hr/> (10.1.2018.)
- [6] Grad Otočac – službena mrežna stranica <http://www.otocac.hr> (8.1.2018.)
- [7] Službeni vjesnik Grada Otočca, broj 4/2014.
- [8] Marković, D. (2017.), *Unaprjeđenje prometnih uvjeta u Gradu Otočcu na načelima održive urbane mobilnosti*–Diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka
- [9] A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, fourth edition, AASHTO, 2001.

[10] Pravilnik o biciklističkoj infrastrukturi (NN 28/2016).

[11] Brown, M. (1995) *TRL State of the Art Review—The Design of Roundabouts*. London: HMSO, 1995.

DIJAGRAMI INTERAKCIJE ZA ARMIRANOBETONSKI ŠUPLJI KRUŽNI POPREČNI PRESJEK

INTERACTION DIAGRAMS FOR REINFORCED CONCRETE HOLLOW CIRCULAR CROSS-SECTION

Željko Smolčić*, Ksenija Blašković**

Sažetak

Opisan je postupak izrade dijagrama interakcije za armiranobetonske šuplje kružne poprečne presjeke prema normi HRN EN 1992-1-1. Zbog uvođenja novih razreda čvrstoće betona s nešto drugačijim parametrima proračunskog dijagrama naprezanje-relativna deformacija, dolazi do potrebe izrade novih dijagrama interakcije. Proveden je postupak proračuna temeljem kojeg su izrađeni dijagrami interakcije za šuplji kružni poprečni presjek za razrede betona od C12/15 do C50/60. Primjenom dobivenih dijagrama interakcije pojednostavljuje se postupak dimenzioniranja armiranobetonskih šupljih kružnih poprečnih presjeka.

Ključne riječi: armirani beton, dimenzioniranje, šuplji kružni poprečni presjek, dijagrami interakcije

Abstract

The procedure for creating interaction diagrams for reinforced-concrete hollow circular cross sections, based on HRN EN 1992-1-1, is described in the paper. Due to introduction of new concrete strength classes, with somewhat different parameters for the stress-relative strain diagram, it has become necessary to develop new interaction diagrams. The computation procedure, based on which hollow circular cross section interaction diagrams were made for concrete classes from C12/15 to C50/60, was conducted. The use of these interaction diagrams will simplify dimensioning of reinforced-concrete hollow circular cross-sections.

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: zeljko.smolcic@uniri.hr

** Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: ksenija.blaskovic@student.uniri.hr

Key words: *reinforced concrete, dimensioning, hollow circular cross-section, interaction diagrams*

1. Uvod

Norma HRN EN 1992 [1] uvodi nove razrede čvrstoća betona; osim uobičajenih betona razreda C12/15 do razreda C50/60 uvode se i novi razredi betona: C55/67, C60/75, C70/85, C80/95 i C90/105. Poznato je su betoni velikih čvrstoća manje duktilni od betona uobičajenih čvrstoća, što ima za posljedicu mijenjanje oblika proračunskog dijagrama naprezanje-relativna deformacija za betone viših razreda. Normom HRN EN 1992 [1] veličina proračunske tlačne čvrstoće betona promijenila se u odnosu na prijašnju normu HRN ENV 1992 [2]. Zbog gore navedenih razloga, javlja se potreba za izradom novih dijagrama interakcije za dimenzioniranje armiranobetonskih kružnih šupljih poprečnih presjeka na savijanje s osnom silom.

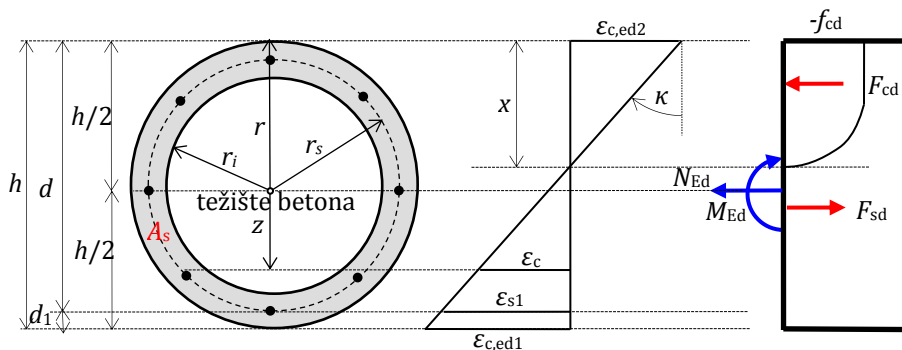
Dijagrami interakcije kružnog šupljeg poprečnog presjeka koji omogućuju proračun prema normi HRN EN 1992-1-1 [1] i normi DIN 1045-1 [3] dostupni su u literaturi [4]. Proračunski dijagrami betona prema normama DIN 1045-1 [3] i HRN EN 1992-1-1 [1] identični su za betone razreda C12/15 do C50/60. Dijagrami interakcije kružnog šupljeg poprečnog presjeka prema normi DIN 1045-1 [3] mogu ponuditi približne vrijednosti, ali se u Hrvatskoj mogu koristiti uz određena ograničenja, budući da su određeni za proračunske dijagrame naprezanje-relativna deformacija čelika za armiranje s kosom gornjom granom u skladu s DIN 1045-1 [3]. Dijagrami interakcije dostupni u literaturi [4] napravljeni su za najveću relativnu deformaciju vlačne armature 0,025 (25‰), dok se u Hrvatskoj uobičajeno rabi 0,02 (20‰) [5]. Osim toga, za betone razreda višeg od C50/60 proračunski dijagrami betona i čelika prema normama DIN 1045-1 [3] i HRN EN 1992-1-1 [1] nisu identični, tako da se dijagrami interakcije prema DIN 1045-1 [3] u Hrvatskoj ne mogu koristiti.

Za izradu dijagrama interakcije korišten je računalni program MathCad 2001i [6]. Dijagrami interakcije dani u ovome radu izrađeni su u sklopu završnog rada [7].

U ovom radu dani su dijagrami interakcije kružnog šupljeg poprečnog presjeka prema normi HRN EN 1992-1-1 [1], za razrede betona od C12/15 do C50/60. Dijagrami interakcije za kružni šuplji poprečni presjek za betone razreda viših od C50/60 dani su u [7].

2. Opis poprečnog presjeka

Opis kružnog šupljeg poprečnog presjeka s armaturom prikazan je na Slici 1. Tlačna naprezanja i tlačne relativne deformacije dane u ovom radu uzimaju se s negativnim predznakom, dok se vlačna naprezanja i vlačne relativne deformacije uzimaju s pozitivnim predznakom.



Slika 1. Kružni šuplji poprečni presjek s raspodjelom deformacija, naprezanja i sila

Deformacija betona u proizvoljnoj točki određuje se kao:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{c,ed2} + \kappa \left(\frac{h}{2} + z \right). \quad (1)$$

Zakrivljenost poprečnog presjeka određuje se prema izrazu:

$$\kappa = \frac{\varepsilon_{s1} - \varepsilon_{c,ed2}}{d}, \quad (2)$$

gdje je:

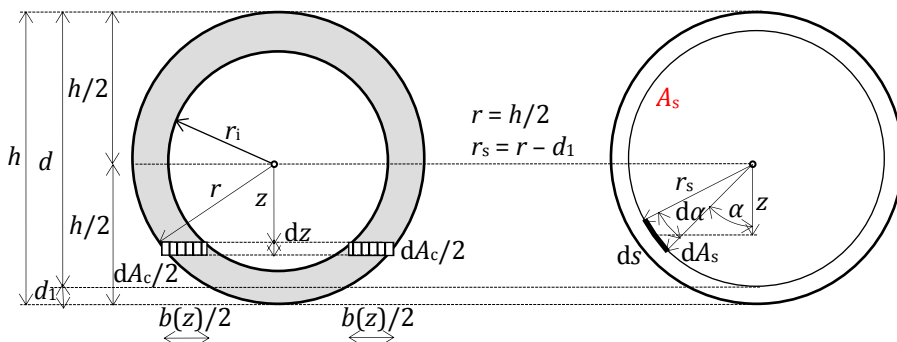
- ε_{s1} - deformacije armature na donjem rubu,
- $\varepsilon_{c,ed2}$ - deformacija betona na gornjem rubu,
- $\varepsilon_{c,ed1}$ - deformacija betona na donjem rubu,
- z - udaljenost od težišta betonskog presjeka do promatrane točke,
- h - ukupna visina presjeka (promjer),
- d - udaljenost gornjeg ruba betona do armature na donjem rubu,
- d_1 - udaljenost jednoliko raspoređene armature od ruba presjeka,
- x - visina neutralne osi,
- r - vanjski polumjer kružnog šupljeg poprečnog presjeka,
- r_i - unutarnji polumjer kružnog šupljeg poprečnog presjeka.

Usvojena je pretpostavka da ravni presjeci i nakon deformacije presjeka ostaju ravni (Bernoullijeva hipoteza ravnih presjeka), što ima za posljedicu da će se sve točke deformiranog presjeka nalaziti u istoj ravnini (ravnini deformacije) koja prolazi kroz neutralnu os presjeka i koja je pod nagibom κ na nedeformiranu ravninu presjeka.

Armatura je jednoliko raspoređena na kružnici radijusa r_s od težišta presjeka betona. Deformacija armature u proizvoljnoj točki kružnice određuje se prema izrazu (Slika 1 i 2):

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{c,ed2} + \kappa \left(\frac{h}{2} + z \right) = \varepsilon_{c,ed2} + \kappa \left(\frac{h}{2} + r_s \cdot \cos\alpha \right), \quad (3)$$

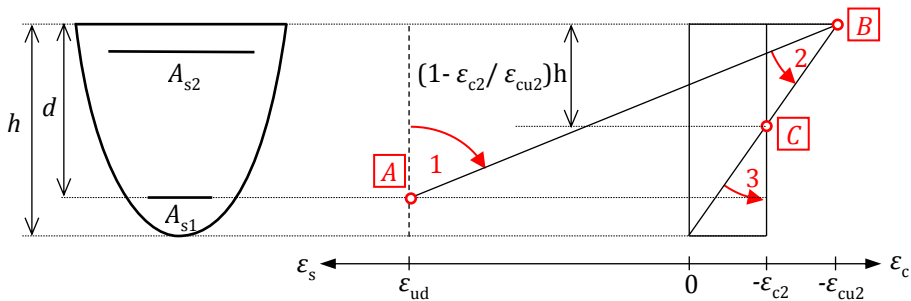
gdje su r_s i α definirani na slici 1 i 2.



Slika 2. Diferencijalne površine betona i armature

Za definiranje ravnine deformacije potrebno je poznavati samo dvije od triju vrijednosti ($\varepsilon_{c,ed2}$, ε_{s1} i κ), što je vidljivo iz izraza (2). Pri konstruiranju dijagrama interakcije dvije od ovih vrijednosti ($\varepsilon_{c,ed2}$, ε_{s1}) treba varirati, dok se treća veličina κ dobiva iz izraza (2).

Pomoću dijagrama interakcije moguće je dimenzioniranje presjeka napregnutih tlačnom ili vlačnom osnom silom s momentom savijanja. Osim toga, dijagrami interakcije mogu se koristiti za dimenzioniranje presjeka napregnutih savijanjem bez osne sile i presjeka napregnutih samo osnom silom. Područja položaja ravnine deformacije općeg poprečnog presjeka prikazana su na Slici 3 [1].



Slika 3. Moguće raspodjele deformacija u armiranobetonskom presjeku općeg oblika prema [1]

Položaji ravnine deformacije varirani su rotacijom ravnine deformacije oko osi koje su paralelne s neutralnom osi presjeka te prolaze kroz točke A, B ili C (Slika 3.):

Područje 1 (rotacija oko točke A)

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{ud}$$

$\varepsilon_{c,ed2}$ varira se od ε_{ud} do $-\varepsilon_{cu2}$

Područje 2 (rotacija oko točke B)

$$\varepsilon_{c,ed2} = -\varepsilon_{cu2}$$

ε_{s1} varira se od ε_{ud} do $(-\varepsilon_{cu2}/h) \cdot d_1$

Područje 3 (rotacija oko točke C)

$\varepsilon_{c,ed2}$ varira se od $-\varepsilon_{cu2}$ do $-\varepsilon_{c2}$

ε_{s1} varira se od $(-\varepsilon_{cu2}/h) \cdot d_1$ do $-\varepsilon_{c2}$

Širina betonskog presjeka dobije se prema Slici 2.:

$$b(z) = 2\sqrt{r^2 - z^2} \quad \text{za } -r \leq z \leq -r_i, \quad (4)$$

$$b(z) = 2\sqrt{r^2 - z^2} - 2\sqrt{r_i^2 - z^2} \quad \text{za } -r_i < z < r_i, \quad (5)$$

$$b(z) = 2\sqrt{r^2 - z^2} \quad \text{za } r_i \leq z \leq r, \quad (6)$$

Diferencijalna površina betona dobije se prema Slici 2:

$$dA_c = b(z) \cdot dz. \quad (7)$$

Diferencijalna površina armature određuje se prema Slici 2, uz pretpostavku da je armatura jednoliko raspoređena na udaljenosti r_s od težišta presjeka betona:

$$dA_s = \frac{A_s}{2 \cdot r_s \cdot \pi} ds = \frac{A_s}{2 \cdot r_s \cdot \pi} (r_s \cdot d\alpha) = \frac{A_s}{2 \cdot \pi} d\alpha. \quad (8)$$

3. Proračunski dijagrami

3.1. Proračunski dijagram betona

Prema normi HRN EN 1992-1-1 [1], vrijednost proračunske tlačne čvrstoće određuje se izrazom:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_C, \quad (9)$$

gdje je f_{ck} karakteristična tlačna čvrstoća betona, γ_C parcijalni koeficijent sigurnosti za beton, a α_{cc} koeficijent kojim se u obzir uzimaju dugotrajni učinci na tlačnu čvrstoću i nepovoljni učinci koji su posljedica načina opterećivanja. Prihvaćena vrijednost u hrvatskom nacionalnom dodatku norme HRN EN 1992-1-1 [1] je $\alpha_{cc} = 1,0$.

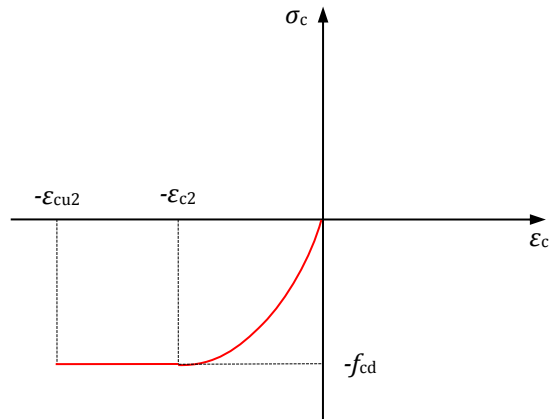
Za dimenzioniranje poprečnih presjeka na savijanje s osnom silom rabi se odnos naprezanje-relativna deformacija betona, prikazan na Slici 4. Značajke betona prikazane su u Tablici 1 [1]. Naprezanje u betonu može se prikazati sljedećim izrazima:

$$\sigma_c = -f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{|\varepsilon_c|}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad \text{za } -\varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq 0, \quad (10)$$

$$\sigma_c = -f_{cd} \quad \text{za } -\varepsilon_{cu2} \leq \varepsilon_c < -\varepsilon_{c2}, \quad (11)$$

$$\sigma_c = 0 \text{ MPa} \quad \text{za } \varepsilon_c > 0, \quad (12)$$

gdje je n eksponent, ε_{c2} je deformacija kad je dosegnuta čvrstoća betona, dok je ε_{cu2} krajnja deformacija (Tablica 1.).



Slika 4. Dijagram naprezanje-relativna deformacija za beton

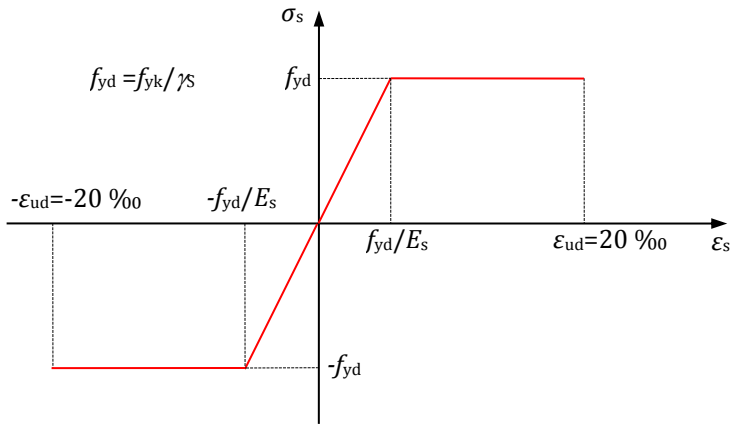
Tablica 1. Značajke betona prema HRN EN 1992-1-1

	C12/15- C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105
f_{ck} (MPa)	12 do 50	55	60	70	80	90
ϵ_{c2} (‰)	2,0	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
ϵ_{cu2} (‰)	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
n	2,0	1,75	1,6	1,45	1,4	1,4

3.2. Proračunski dijagram čelika za armiranje

Prema normi HRN EN 1992-1-1 [1], za dimenzioniranje presjeka može se koristiti dijagram naprezanje-relativna deformacija za čelik za armiranje s horizontalnom gornjom granom bez potrebe ograničenja deformacije. Za konstruiranje dijagrama interakcije koji se prikazuju u ovom radu upotrijebljen je proračunski dijagram naprezanje-relativna deformacija za čelik za armiranje s horizontalnom gornjom crtom s najvećom deformacijom $\epsilon_{ud} = 0.02$ (20 ‰) (Slika 5).

Na Slici 5 f_{yk} je karakteristična granica popuštanja čelika za armiranje, f_{yd} je proračunska granice popuštanja čelika za armiranje a γ_s je parcijalni koeficijent za čelik za armiranje.



Slika 5. Dijagram naprezanje-relativna deformacija za čelik za armiranje

Naprezanje u armaturi (prema Slici 5) iznosi:

$$\sigma_s = -f_{yd} \quad \text{za } -\varepsilon_{ud} \leq \varepsilon_s \leq -\varepsilon_{yd}, \quad (13)$$

$$\sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s \quad \text{za } -\varepsilon_{yd} < \varepsilon_s < \varepsilon_{yd}, \quad (14)$$

$$\sigma_s = f_{yd} \quad \text{za } \varepsilon_{yd} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{ud}, \quad (15)$$

gdje je modul elastičnosti čelika $E_s = 200000$ MPa, a f_{yd} proračunska granica popuštanja armature.

4. Jednadžbe ravnoteže

Proračunska tlačna sila u betonu određuje se prema izrazu:

$$F_{cd} = \int_{A_c} \sigma_c \cdot dA_c = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_c \cdot b(z) \cdot dz. \quad (16)$$

Proračunska sila u armaturi proračunava se s pomoću izraza:

$$F_{sd} = \int_{A_s} \sigma_s \cdot dA_s = \int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot \left(\frac{A_s}{2 \cdot \pi} d\alpha \right), \quad (17)$$

gdje je A_s ukupna površina presjeka armature.

U presjecima istodobno napreznim momentom savijanja i osnom silom potrebno je simultano zadovoljiti dva uvjeta:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd}, \quad (18)$$

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}, \quad (19)$$

gdje je:

N_{Ed} - proračunska djelujuća osna sila,

M_{Ed} - proračunski djelujući moment savijanja,

N_{Rd} - otpornost presjeka na djelovanje osne sile,

M_{Rd} - moment nosivosti presjeka.

Otpornost presjeka na djelovanje osne sile iznosi:

$$N_{Rd} = F_{cd} + F_{sd}. \quad (20)$$

Kada se izraz (20) uvrsti u izraz (18) dobije se:

$$N_{Ed} \leq F_{cd} + F_{sd}, \quad (21)$$

odnosno kada se u prethodni izraz (21) uvrste izrazi (16) i (17) za F_{cd} i F_{sd} dobiva se:

$$N_{Ed} \leq \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_c \cdot b(z) \cdot dz + \int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot \left(\frac{A_s}{2 \cdot \pi} d\alpha \right). \quad (22)$$

Kada se izraz (22) podijeli faktorom $A_c \cdot f_{cd}$, dobiva se:

$$\frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} \leq \frac{\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_c \cdot b(z) \cdot dz}{A_c \cdot f_{cd}} + \frac{A_s \cdot f_{yd} \int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \pi} d\alpha \right)}{A_c \cdot f_{cd} \cdot f_{yd}}, \quad (23)$$

gdje je $A_c = r^2\pi - r_i^2\pi$ površina betonskog poprečnog presjeka.

U izraz (23) uvode se bezdimenzijska veličina osne sile ν_{Ed} i mehanički koeficijent armiranja ω :

$$\nu_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}}, \quad (24)$$

$$\omega = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}}, \quad (25)$$

te se za $N_{Ed} = N_{Rd}$ dobiva:

(26)

$$v_{Ed} = \frac{\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_c \cdot b(z) \cdot dz}{A_c \cdot f_{cd}} + \omega \frac{\int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \pi} d\alpha \right)}{f_{yd}}. \quad (27)$$

Moment nosivosti kojim se presjek odupire savijanju iznosi:

$$M_{Rd} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_c \cdot z \cdot b(z) \cdot dz + \int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot z \cdot \left(\frac{A_s}{2 \cdot \pi} d\alpha \right), \quad (28)$$

odnosno:

$$M_{Rd} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_c \cdot z \cdot b(z) \cdot dz + \int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot (r_s \cdot \cos\alpha) \cdot \left(\frac{A_s}{2 \cdot \pi} d\alpha \right). \quad (29)$$

Kada se izraz (29) uvrsti u izraz (19) dobije se:

$$M_{Ed} \leq \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_c \cdot z \cdot b(z) \cdot dz + \int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot (r_s \cdot \cos\alpha) \cdot \left(\frac{A_s}{2 \cdot \pi} d\alpha \right), \quad (30)$$

a zatim se izraz (30) podijeli faktorom $A_c \cdot h \cdot f_{cd}$:

$$\frac{M_{Ed}}{A_c \cdot h \cdot f_{cd}} \leq \frac{\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_c \cdot z \cdot b(z) \cdot dz}{A_c \cdot h \cdot f_{cd}} + \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}} \cdot \frac{\int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot (r_s \cdot \cos\alpha) \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \pi} d\alpha \right)}{h \cdot f_{yd}}. \quad (31)$$

U izraz (31) uvodi se mehanički koeficijent armiranja ω (izraz (25)) i bezdimenzijska veličina momenta savijanja μ_{Ed} :

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{A_c \cdot h \cdot f_{cd}}, \quad (32)$$

te se za $M_{Ed} = M_{Rd}$ dobiva algebarska veza između bezdimenzijske veličine momenta savijanja μ_{Ed} i mehaničkog koeficijenta armiranja ω :

$$\mu_{Ed} = \frac{\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_c \cdot z \cdot b(z) \cdot dz}{A_c \cdot h \cdot f_{cd}} + \omega \cdot \frac{\int_0^{2\pi} \sigma_s \cdot (r_s \cdot \cos\alpha) \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \pi} d\alpha\right)}{h \cdot f_{yd}}. \quad (33)$$

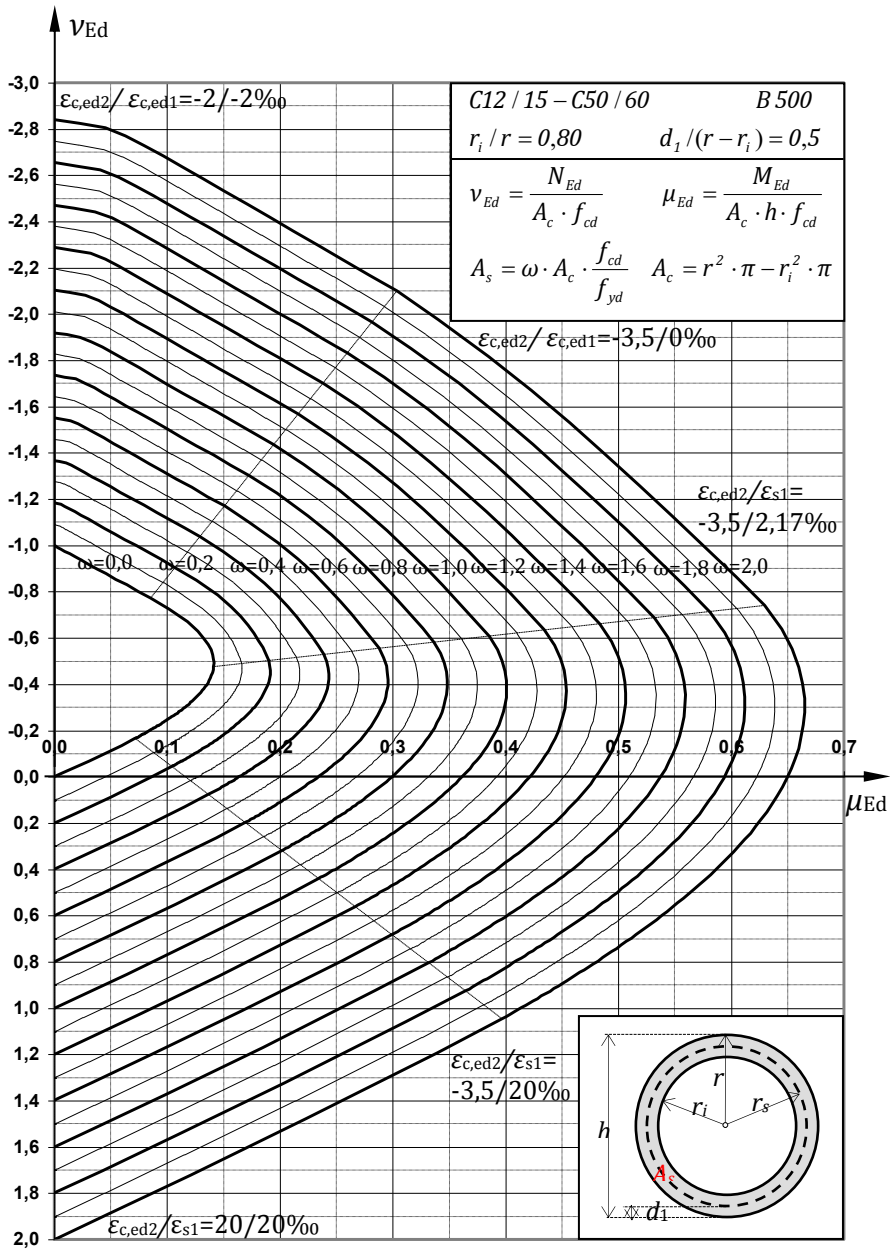
Potrebna se površina presjeka armature, jednoliko raspoređene na udaljenosti r_s od težišta presjeka betona, određuje s pomoću izraza:

$$A_s = \omega \frac{f_{cd}}{f_{yd}} A_c. \quad (34)$$

Dijagrami interakcije dobiveni su na način da su varirane deformacije čelika ϵ_{s1} i betona $\epsilon_{c,ed2}$ (zakrivljenost κ) i mehanički koeficijent armiranja ω , te su proračunavane vrijednosti ν_{Ed} (27) i μ_{Ed} (33) koje su nanesene u koordinatni sustav $\nu_{Ed} - \mu_{Ed}$. Dijagrami interakcije (Slika 6) izrađeni su za kružni šuplji poprečni presjek i za betone razreda C12/15 do C50/60, čelik B500 te za omjer $d_1/h = 0,1$.

Jednadžbe ravnoteže (27) i (33) postavljene su na način da vrijede za sva tri područja ravnine deformacije poprečnog presjeka (Slika 3). Umjesto analitičkog rješavanja integrala u jednadžbama (27) i (33), u programu MathCad [6], korištena je numerička integracija.

Naprezanja betona σ_c u izrazima (27) i (33) integriraju se po cijeloj visini presjeka, to jest od $-h/2$ do $h/2$. Naprezanja armature σ_s u izrazima (27) i (33) integriraju se po cijeloj kružnici, to jest, od kuta $\alpha = 0$ do 2π . Naprezanja u betonu određuju se prema izrazima (10) do (12), a naprezanja u čeliku prema izrazima (13) do (15).



Slika 6. Dijagrami interakcije za kružni šuplji poprečni presjek C12/15 do C50/60, B500, $r_i/r=0,80$, $d_1/(r-r_i)=0,5$

5. Numerički primjer

Treba dimenzionirati kružni šuplji poprečni presjek stupa promjera $h = 100$ cm ($r = 50$ cm) i unutarnjeg radijusa $r_i = 40$ cm, čija je armatura jednoliko raspoređena na udaljenosti $d_1 = 5$ cm od ruba presjeka. Stup se predviđa izvesti od betona razreda C30/37, i čelika za armiranje B500B. Promatrani presjek napregnut je sljedećim proračunskim presječnim silama: $M_{Ed} = 1130,97$ kNm i $N_{Ed} = -5654,87$ kN.

Omjer:

$$\frac{r_i}{r} = \frac{40}{50} = 0,8 \quad \frac{d_1}{r - r_i} = \frac{5}{50 - 40} = 0,5$$

Proračunska tlačna čvrstoća betona:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1,0 \cdot \frac{30}{1,5} = 20 \text{MPa}$$

Proračunska granica popuštanja armature:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{MPa}$$

Površina betonskog presjeka:

$$A_c = r^2 \cdot \pi - r_i^2 \cdot \pi = 50^2 \cdot \pi - 40^2 \cdot \pi = 2827,43 \text{ cm}^2$$

Bezdimenzijska veličina osne sile:

$$\nu_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{-5654,87}{2827,43 \cdot 2,0} = -1,000$$

Bezdimenzijska veličina momenta savijanja:

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{A_c \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{113097}{2827,43 \cdot 100 \cdot 2,0} = 0,200$$

Mehanički koeficijent armiranja očita se sa Slike 6:

$$\nu_{Ed} = -1,000, \mu_{Ed} = 0,200 \Rightarrow \omega = 0,60$$

Potrebna se površina armature, jednoliko raspoređena na udaljenosti r_s od težišta presjeka betona, određuje pomoću izraza:

$$A_s = \omega \frac{f_{cd}}{f_{yd}} A_c = 0,60 \frac{2,0}{43,478} 2827,43 = 78,04 \text{ cm}^2$$

U ovom primjeru nije se provjeravala minimalna i maksimalna armatura prema normi HRN EN 1992 [1].

Kontrola prikazanog primjera dimenzioniranja kružnog šupljeg presjeka provedena je s pomoću računalnog programa Gala Reinforcement 4.1e[®] [8] i programa za dimenzioniranje armiranobetonskog kružnog šupljeg presjeka (program KP) [9]. Program Gala Reinforcement 4.1e[®] [8] služi za dimenzioniranje armiranobetonskih poprečnih presjeka proizvoljnih oblika naprezanih ravnim ili kosim savijanjem s osnom silom. Program KP [9] izrađen je s pomoću računalnog programa MathCad 2001i [6] u sklopu završnog rada [9] i služi za dimenzioniranje armiranobetonskih kružnih šupljih poprečnih presjeka naprezanih ravnim savijanjem s osnom silom.

Program Gala Reinforcement 4.1e[®] [8] ne može se zadavati jednoliko raspoređena armatura već se armatura zadaje kao točkasta armatura, dok je programom KP [9] moguće zadavati jednoliko raspoređenu armaturu.

Vidljivo je da su rezultati dobiveni programom Gala Reinforcement 4.1e[®] [8] i programom KP [9] vrlo bliski (Tablica 2.). Razlika u dobivenim rezultatima pripisuje se različitom načinu definiranja razmještaja armature. Program Gala Reinforcement 4.1e[®] [8] ne može zadavati jednoliko raspoređenu armaturu već se armatura zadaje kao točkasta armatura (u primjeru 36 šipki armature). Proračunata armatura u primjeru, uz primjenu dijagrama interakcije, zanemarivo je manja. To je posljedica korištenja dijagrama interakcije, kod kojih točnost proračuna ovisi o odoka očitanoj vrijednosti mehaničkog koeficijenta armiranja ω . Razlika u rezultatima može biti posljedica različitog tretiranja betona na mjestu armature. Program Gala Reinforcement 4.1e[®] [8] i program KP [9] uzimaju u obzir da se na mjestu čelika za armiranje ne može nalaziti beton, dok kod dijagrama interakcije [7] ta pretpostavka ne vrijedi.

Tablica 2. Rezultati proračuna

veličine	dijagram interakcije [7]	program KP [9]	program Gala [8]
A_s	78,04 cm ²	81,05 cm ²	81,28 cm ²
$\epsilon_{c,ed2}$	-3,50 ‰	-3,50 ‰	-3,50 ‰
ϵ_{s1}	oko 0,50 ‰	0,275 ‰	0,276 ‰
x		88,07 cm	88,05 cm

6. Zaključak

Prikazani su dijagrami interakcije za kružni šuplji poprečni presjek prema normi HRN EN 1992-1-1 za razrede betona od C12/15 do C50/60.

Dijagrami interakcije za kružni šuplji poprečni presjek dobiveni su na način da jednadžbe ravnoteže vrijede u svim područjima ravnine deformacije poprečnog presjeka i prilagođene su računalnim programima koji imaju mogućnost programiranja proračunskih procedura kao što je program MathCad.

Nedostatak opisanog postupka je relativno veliko vrijeme proračuna dijagrama interakcije zato što se, umjesto analitičkog rješavanja integrala, u programu MathCad, koristila numerička integracija. S obzirom na brzinu današnjih osobnih računala to više ne predstavlja veliki problem.

S pomoću prikazanih dijagrama interakcije mogu se jednostavno, brzo i s dovoljnom točnošću dimenzionirati kružni šuplji armiranobetonski presjeci. Danas na raspolaganju postoje mnogi komercijalni računalni programski paketi s pomoću kojih se može provoditi proračun i automatsko dimenzioniranje armiranobetonskih konstrukcija, ali još uvijek postoji potreba za pomagalima za dimenzioniranje kao što su dijagrami interakcije.

Dijagrami interakcije mogu poslužiti kao kontrola dimenzioniranja provedenih pomoću komercijalnih programskih paketa u kojima su programirane procedure često podložne određenim pojednostavljenjima ili korisnicima programskih paketa nepoznatim interpretacijama normi i teorije armiranobetonskih konstrukcija od strane njihovih autora.

Prikazani postupak izrade dijagrama interakcije za kružni šuplji poprečni presjek može se primijeniti i za puni kružni poprečni presjek ($r_i=0$ m). Osim toga, prikazani postupak izrade dijagrama interakcije za kružni šuplji poprečni presjek može se, uz preradu, koristiti za bilo kakav poprečni presjek kod kojeg znamo funkciju promjene širine poprečnog presjeka $b(z)$.

Literatura

- [1] HRN EN 1992-1-1, Eurokod 2. (2008) Projektiranje betonskih konstrukcija - 1-1. dio: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1992-1-1:2004+AC:2008) (prema EN1992-1-1:2004). Zagreb: HZN.
- [2] HRN ENV 1992-1-1, Eurokod 2. (2004) Projektiranje betonskih konstrukcija - 1-1. dio: Opća pravila i pravila za zgrade (prema ENV 1992-1-1:1991). Zagreb: HZN.
- [3] DIN 1045-1. (2009) Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Betonkalender 2009. Berlin: Ernst & Sohn.

- [4] Zilch, K., Zehetmaier, G. (2010) Bemessung im konstruktiven Betonbau Nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2). Berlin Heidelberg: Springer.
- [5] Sorić, Z., Kišiček, T. (2014) *Betonske konstrukcije 1*. Zagreb: Građevinski fakultet Zagreb.
- [6] Mathcad. (2001) User's Guide with Reference Manual Mathcad 2001i. MathSoft Engineering & Education.
- [7] Blašković, K. (2012) *Dijagrami interakcije za kružni šuplji presjek*. Završni rad. Rijeka: Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci.
- [8] Alashki, I. (2010) *Računalni program Gala Reinforcement 4.1e*. Sofija: Alashki.e.c Group.
- [9] Peričić, L. (2017) *Program za dimenzioniranje šupljeg kružnog presjeka*, Završni rad. Rijeka: Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci.

NELINEARNA ANALIZA VITKIH ČELIČNIH GREDA

NONLINEAR ANALYSIS OF SLENDER STEEL BEAMS

Izabela Šutić*, Paulina Krolo*, Mladen Bulić*

Sažetak

U radu je provedena analiza ponašanja tankostjenog hrpta neukrućene zavarene grede na utjecaj jednoliko raspodijeljenog vertikalnog opterećenja. Izrađen je numerički model grede u programskom paketu ABAQUS. Cilj ovog rada je dobiti vjernu numeričku simulaciju ponašanja grede u usporedbi s laboratorijski ispitanom gredom čiji su rezultati ispitivanja preuzeti iz literature te analizirati pojavu izbočivanja u zoni panela hrpta. Provedena je linearna analiza kojom su određeni vlastiti oblici izbočivanja grede te nelinearna analiza kojom su određene vrijednosti deformiranja grede. Na kraju je dana usporedba rezultata dobivenih numeričkim simulacijama s rezultatima laboratorijskog ispitivanja.

Ključne riječi: izbočivanje, vitka čelična greda, vlastiti oblici izbočivanja, ABAQUS

Abstract

The behavior of the slender web plate of the welded unstiffened beam under uniformly distributed vertical load was analyzed in this paper. A numerical model of the beam was created in the ABAQUS program. The aim of this paper is to get a faithful numerical simulation of the beam behavior compared to the laboratory-tested beam whose test results are taken from the literature and analyze the occurrence of buckling in the zone of web panel. Linear analysis was used to determine the buckling eigenvalue of the beam and nonlinear analysis was used to deformation values of the beam. Finally, the comparison between the results obtained by numerical simulations with the results of laboratory tests were carried out.

Key words: buckling, slender steel beam, buckling eigenvalues, ABAQUS

*Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51 000 Rijeka
E-mail: izabela.sutic@student.uniri.hr, paulina.krolo@uniri.hr, mbulic@gradri.uniri.hr

1. Uvod

Vitke čelične grede su konstrukcijski elementi koji se sastoje od relativno tankih pločastih elemenata. Budući da poprečni presjeci vitkih greda pripadaju klasi 4, u slučaju kada su tlačno opterećeni u svojoj ravnini mogu se lokalno izbočiti. Izbočivanje je pojava nestabilnosti ravnoteže u elementima konstrukcije koje proizlazi uslijed tlačnih naprezanja koja djeluju u ravnini elementa. Pojava lokalnog izbočivanja u poprečnom presjeku ograničava otpornost presjeka, ali i čitavog elementa na djelovanje uzdužne sile ili savijanja. Konstrukcija ili neki njezin element izveden od tankostjenih elemenata može doživjeti slom zbog izbočivanja pri opterećenjima koja su daleko manja od onih koja uzrokuju slom dosežanjem čvrstoće materijala. Kod projektiranja vitkih čeličnih greda potrebno je dobro poznavati njihova nelinearna svojstva, probleme izbočivanja te gubitak stabilnosti takvih elemenata.

Težnja za primjenom vitkih čeličnih konstrukcija uglavnom proizlazi zbog ekonomskih i tehničkih zahtjeva za smanjenje težine konstrukcije te uvođenja novih materijala visoke čvrstoće. Osim toga, želja za primjenom lagane konstrukcije proizlazi zbog ekonomske isplativosti koja se postiže konstruiranjem u tvornici, prilikom izvedbe konstrukcije, kao i poslije u eksploataciji [1]. Konstrukcije s vitkim elementima koriste se u naftnoj i rudarskoj industriji, konstrukcijama platformi te za mostove velikih raspona. Važno je napomenuti da su grede s vitkim hrptovima, unatoč primjene tankih limova, ipak skupe. Znatan trošak odlazi na izvedbu poprečnih ukrućenja koja se uglavnom postavljaju i zavaruju u radioni. Prednosti primjene neukrućenih greda tj. greda bez poprečnih ukrućenja su jednostavnija izvedba i uporaba automatskih strojeva za zavarivanje radi smanjenja troškova izvedbe [2].

U radu je prikazan numerički model vitke čelične grede, zavarenog I-poprečnog presjeka, opterećene na savijanje. Cilj je numeričkim modelom što bolje aproksimirati rezultate dobivene laboratorijskim ispitivanjem koje su proveli autori Chern i Kunapongsir, 1973. godine [2] te lokalizirati pojavu izbočivanja u samoj gredi.

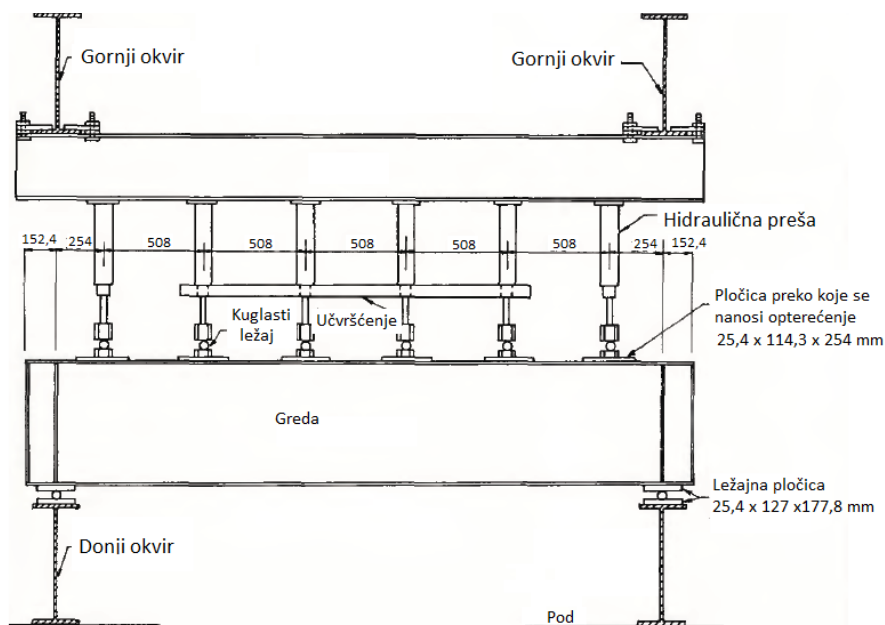
2. Opis laboratorijskog ispitivanja

U ovom dijelu rada dani su podaci o laboratorijskom ispitivanju grede prema [2], koji su dalje primijenjeni za prikaz numeričkog modela.

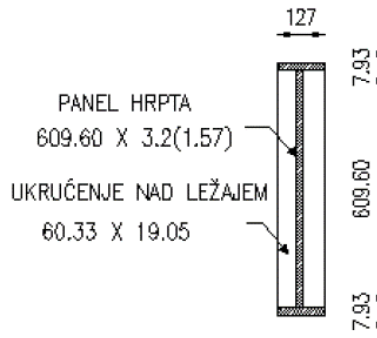
Statički sustav ispitne grede je slobodno oslonjena greda ukupne duljine od 3352,8 mm. Na gredi su izvedene ukrute na krajevima i iznad svakog ležaja od limova debljine 19,05 mm. Tlačna pojasnica je bočno pridržana na oba kraja i na trećinama raspona grede pomoću čeličnih kutnika. Na Slici 1

dan je shematski prikaz laboratorijskog ispitivanja grede. Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka grede prikazane su na Slici 2. Vitkost hrpta iznosi 192 (omjer visine i debljine hrpta).

Opterećenje je nanošeno u fazama na gornju pojasnicu grede primjenom šest hidrauličnih preša. Tijekom postupka ispitivanja praćeno je ponašanje u svim fazama opterećivanja na način da su očitavanja uzimana prije svake faze. Mjerni instrumenti, korišteni u eksperimentu, su mikroure i elektrootporne mjerne trake. Mikrourama su mjereni vertikalni progibi grede te horizontalni otkloni hrpta, a elektrootpornim mjernim trakama su praćena naprezanja u gredi. Drugi detalji o samom postupku ispitivanja dostupni su u [2].



Slika 1. Shematski prikaz laboratorijskog ispitivanja grede [2]



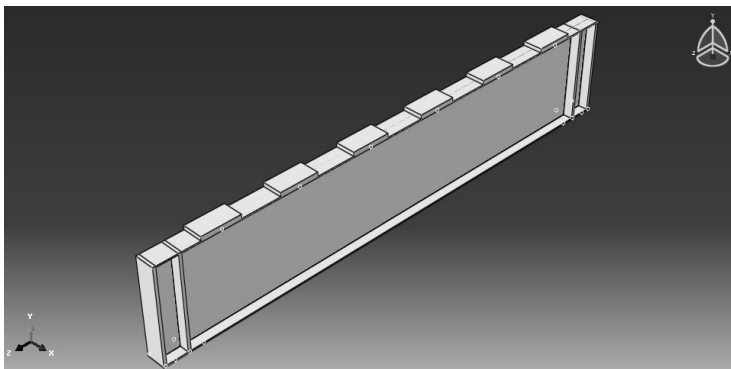
Slika 2. Poprečni presjek ispitane grede [mm] [2]

3. Numerički model

U nastavku je dan detaljan prikaz numeričkog modela vitke čelične grede, za što je primijenjen numerički računalni program ABAQUS [3].

3.1. Geometrija modela

Poprečni presjek modela grede napravljen je u modulu „Part“. Greda je modelirana primjenom „Solid“ 3D konačnih elementa. Kako bi što vjernije simulirali svojstva laboratorijskog modela grede, pri formiranju numeričkog modela su uzeti u obzir svi detalji na gredi. Modelirane su pločice na gornjoj pojasnici grede preko kojih je nanošeno opterećenje. One dodatno povećavaju debljinu pojasnice i na taj način sprječavaju izvijanje uslijed djelovanja opterećenja. Također su modelirane ukrute na oba kraja grede i iznad ležajeva. Na Slici 3 je prikazana geometrija numeričkog modela grede. Definiranje osi nosača x, y i z; os x: okomita na uzdužnu os grede, os y: vertikalna os grede, os z: uzdužna os grede.



Slika 3. Prikaz grede s modeliranim pločicama i ukrućenjima [3]

3.2. Svojstva materijala

Svojstva materijala se definiraju u modulu „Property“. Greda je izvedena od čelika, a za opisivanje materijalnog modela odabrane su srednje vrijednosti izmjerenih svojstava čelika dobivenih laboratorijskim ispitivanjima. Svojstva čelika dobivena laboratorijskim ispitivanjima približno odgovaraju svojstvima europskog čelika razreda S275. U Tablici 1 dana su svojstva čelika pri čemu su granica popuštanja f_y , čvrstoća f_u te deformacija pri slomu ε_{u1} izračunati kao srednje vrijednosti inženjerskih (izmjerenih) naprezanja i deformacija čije su vrijednosti dostupne u radu [2]. Deformacija pri granici popuštanja ε_y određena je s dijagrama iz [2], dok je za deformaciju pri čvrstoći ε_u pretpostavljena vrijednost od 18%, što odgovara deformaciji čelika klase S275. Ova pretpostavka je uvedena zato što se vrijednost deformacije nije mogla točno definirati s obzirom da su svojstva čelika dobivena nestandardnim ispitivanjem.

Za opisivanje ponašanja čelika u numeričkom modelu grede odabran je trilinearni matematički model. Elastična svojstva čelika su definirana Youngovim modulom elastičnosti E prema izrazu (1), te Poissonovim koeficijentom ν od 0,3.

$$E = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y} \quad (1)$$

Tablica 1. Svojstva čelika [3]

f_y [MPa]	f_u [MPa]	ε_y [%]	ε_u [%]	ε_{u1} [%]
286,5	419,6	0,20	18,00	36,96

Oznake u tablici 1:

f_y – granica popuštanja

f_u – čvrstoća

ε_y – deformacija pri granici popuštanja

ε_u – deformacija pri čvrstoći

ε_{u1} – deformacija pri slomu

Za opisivanje plastičnih svojstava čelika u programu ABAQUS potrebno je inženjerske (izmjerene) vrijednosti naprezanja σ_{nom} i deformacija ε_{nom} transformirati u stvarne vrijednosti naprezanja „true stress“ σ , te stvarne vrijednosti deformacija „true strain“ ε . Odnosi između stvarnih i inženjerskih deformacija i naprezanja definirani su izrazima (2) i (3) [4] te su prikazani dijagramima na Slici 4.

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (2)$$

$$\sigma = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (3)$$

gdje je:

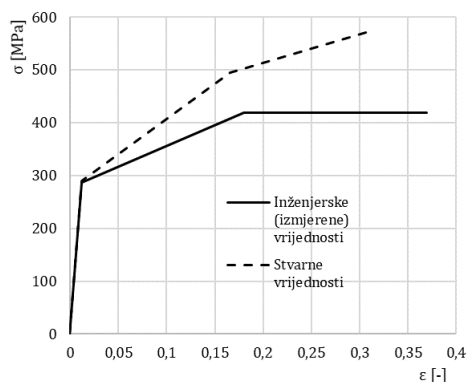
ε – stvarna deformacija

ε_{nom} – inženjerska deformacija

σ – stvarno naprezanje

σ_{nom} – inženjersko naprezanje

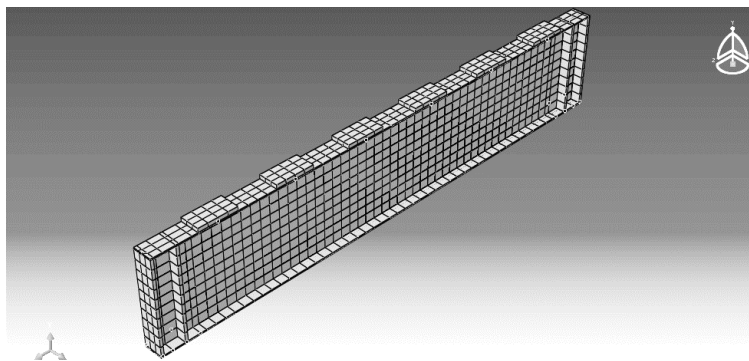
E – Youngov modul elastičnosti



Slika 4. Dijagrami odnosa naprezanja i deformacija ($\sigma - \varepsilon$) za inženjerske i stvarne vrijednosti

3.3. Generiranje mreže konačnih elemenata

Prije generiranja mreže konačnih elemenata, numerički model grede podijeljen je na područja primjenom „Partition“ alata kako bi dobili pravilnu mrežu. Područja su napravljena na mjestima oslonaca, pločica preko kojih se nanosi opterećenje, između pojasnica i hrpta, te između ukruta i grede. Na Slici 5, primjenom modula „Mesh“ i naredbe „Seed Part“, generirana je mreža konačnih elemenata. Odabrani su konačni elementi tipa C3D8R, što predstavlja osmočvorne kvadratne elemente s reduciranom integracijom.



Slika 5. Prikaz mreže konačnih elemenata [3]

3.4. Definiranje rubnih uvjeta i djelovanja

U „Load“ modulu definirani su rubni uvjeti grede te djelovanje opterećenja. Primjenom „Set manager“ alata definirani su čvorovi u kojima se definiraju položaji lijevog i desnog ležaja te horizontalna pridržanja, dok su površine na kojima djeluje opterećenje definirane primjenom „Surface manager“ alata.

3.4.1. Lijevi i desni ležaj

Greda je oslonjena na svojim krajevima na dva zglobna ležaja, a iznad svakog ležaja se nalaze limovi za ukrućenje. Osni razmak između ležajeva je 3048 mm, a razmak od ruba grede do početka ležaja je 73,025 mm. Površina ležajne pločice dimenzija 127x177,8 mm iznosi 22580,6 mm². Definiranje lijevog i desnog ležaja provedeno je u „Load“ modulu. Oslonci su definirani u „Initial stepu“, budući da moraju biti aktivirani prije djelovanja opterećenja. Na ležajevima su spriječeni pomaci u svim smjerovima x, y i z te rotacije oko y i z osi, a dozvoljena je rotacija oko x osi. Dozvoljena rotacija oko x osi omogućuje rotaciju greda pri djelovanju vertikalnog opterećenja.

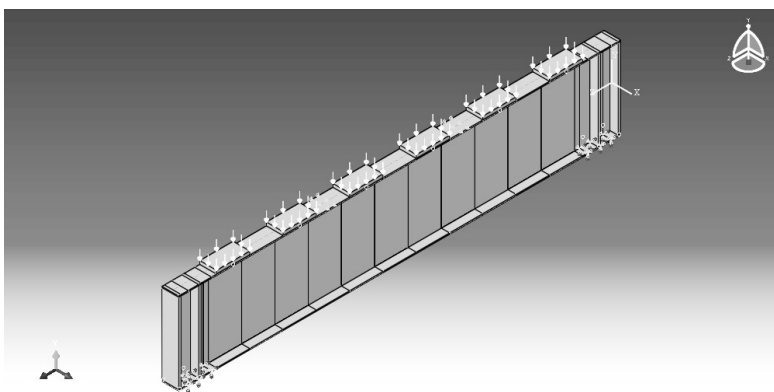
3.4.2. Horizontalna pridržanja tlačne pojasnice

U numeričkom modelu, gornja pojasnica grede pridržana je samo na trećinama raspona, odnosno na udaljenosti od 1123,95 mm u odnosu na rub grede, dok su pri laboratorijskom ispitivanju pridržanja izvedena i na krajevima. Laboratorijski modeli gotovo uvijek imaju nekakav oblik nesavršenosti (geometrijski i/ili materijalni), pa su stoga izvedene ukrute na krajevima greda koje mogu spriječiti moguće prevrtanje modela ili torzijske učinke, dok numerički model nema takve nesavršenosti. Budući da je numerički model simetričan (idealno), prethodno navedeni efekti nisu

prisutni pa nije bilo potrebno definirati pridržanja na rubovima greda. Horizontalna pridržanja definirana su u „Load“ modulu. U čvorovima koji predstavljaju horizontalna pridržanja spriječen je horizontalni pomak u x smjeru, a dopušteni su pomaci u y i z smjeru te rotacije oko x, y i z osi.

3.4.3. Zadavanje opterećenja

U laboratorijskom ispitivanju, koncentrirane sile nanese su hidrauličkim prešama na površine pločica preko kojih se opterećenje prenosi na samu gredu. U numeričkom modelu je opterećenje simulirano kao pritisak po površinama pločica, što je prikazano na Slici 6.



Slika 6. Prikaz simuliranja vertikalnog opterećenja na gornjoj pojasnici grede [3]

U nastavku rada je detaljnije objašnjen postupak provedbe analize ponašanja grede.

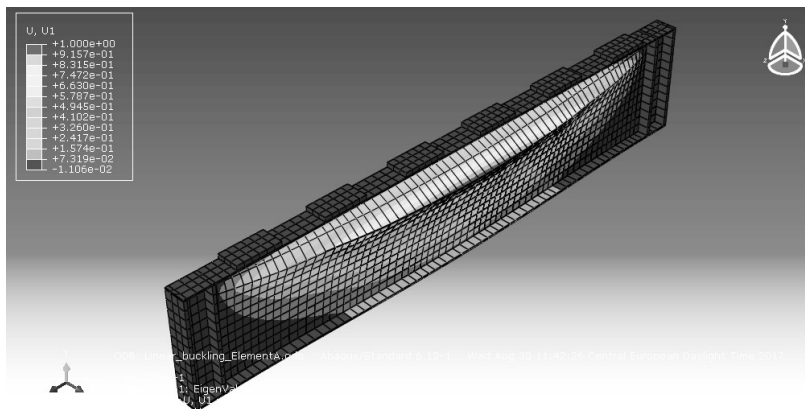
4. Vlastiti oblici izbočivanja i nelinearna analiza

Nakon postupka numeričkog modeliranja grede (definiranja geometrije, definiranja svojstava materijala, generiranja mreže konačnih elemenata te zadavanja rubnih uvjeta), potrebno je definirati postupak opterećivanja grede tako da se rezultati ponašanja dobiveni numeričkom simulacijom što bolje približe rezultatima laboratorijskog ispitivanja.

Postupak se sastoji od dva dijela. Prvo su određeni vlastiti oblici izbočivanja grede primjenom linearne analize („Eigenvalue buckling analysis“). Definiranjem vlastitih oblika lociramo čvorove na gredi u kojima će se prvo početi pojavljivati pomaci koji prethode pojavi izbočivanja grede. Nakon toga se provodi nelinearna analiza („Postbuckling analysis“) u kojoj

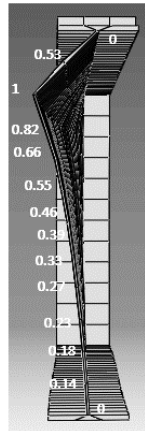
je potrebno zadati geometrijske nesavršenosti. Ove geometrijske nesavršenosti, kakve je potrebno zadati u numeričkom modelu, ne predstavljaju stvarne imperfekcije grede koje se javljaju u laboratorijskim modelima. Numeričkim modeliranjem stvorene su idealne grede koje nemaju nikakve geometrijske ili materijalne imperfekcije. Kako bi se omogućila pojava izbočivanja grede tijekom nelinearnog proračuna, neophodno je zadati male početne pomake čvorova u kojima će nastupiti pojava izbočivanja u kojima se zadaju tzv. geometrijske nesavršenosti. Čvorovi u kojima će se pojaviti izbočivanja locirani su prethodno provedenom linearnom analizom. Vrijednost geometrijske nesavršenosti zadaje se u postotku debljine lima u kojemu se očekuje pojava izbočivanja.

Kako je prethodno objašnjeno, na površinama pločica je zadano jedinično pritisno opterećenje s namjerom da se dobiju vlastiti oblici izbočivanja hrpta. Na Slici 7 prikazan je prvi oblik izbočivanja grede, što predstavlja oblik mehanizma sloma. Prvi oblik izbočivanja se javlja u hrptu ispod tlačne pojasnice. U lijevom gornjem kutu Slike 7 prikazana je skala vrijednosti horizontalnih pomaka hrpta u x smjeru pri djelovanju jediničnog opterećenja.



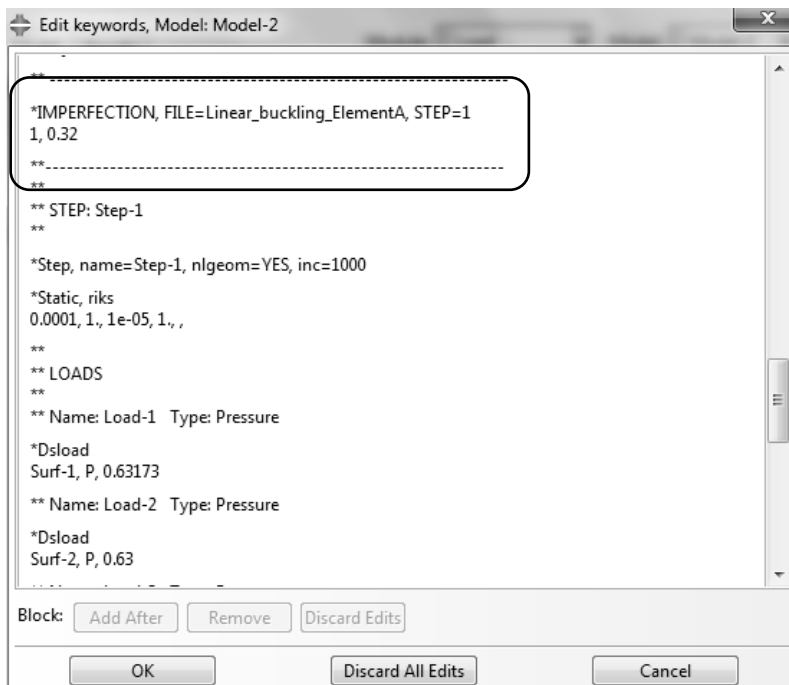
Slika 7. Prvi vlastiti oblik izbočivanja grede [3]

Na Slici 8 prikazan je poprečni presjek grede na sredini raspona. Vrijednosti na Slici 8 predstavljaju horizontalne pomake hrpta grede. Lokalno izbočivanje pojavilo se u hrptu ispod tlačne pojasnice.



Slika 8. Poprečni presjek grede na sredini raspona za prvi oblik izbočivanja grede [3]

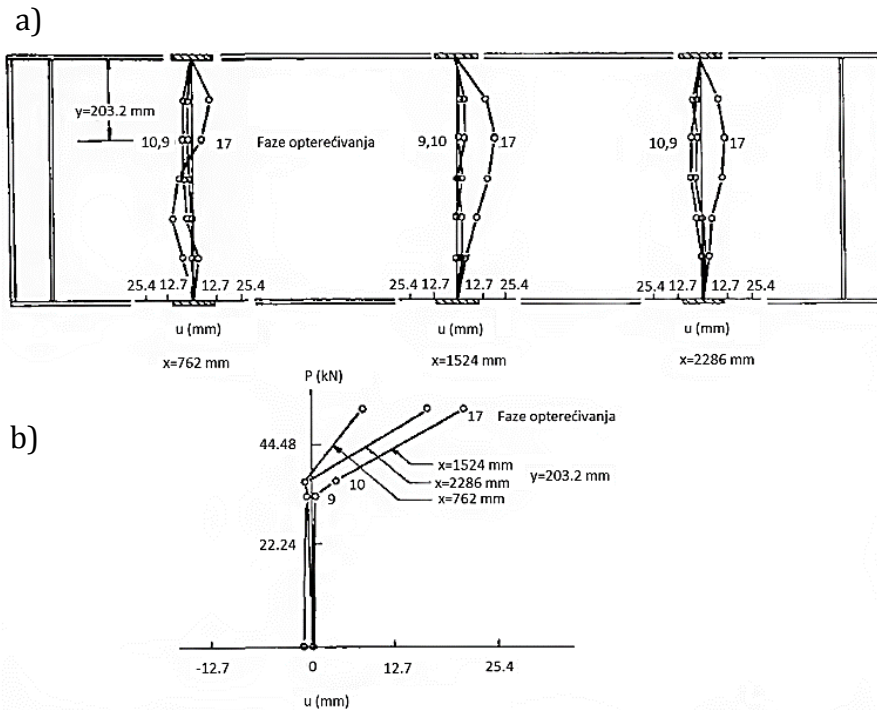
Zadavanje geometrijskih nesavršenosti provodi se definiranjem određenih naredbi u kodu programa. Zadaje se naredba na način kako je to prikazano na Slici 8, neposredno prije koraka u kojem smo zadali provođenje „Static Riks“ analize [5]. Kako bi zadali nesavršenosti prije provedbe nelinearne analize, potrebno je povezati izlazne rezultate linearne analize (pomake čvorova) s kodom za provedbu nelinearne analize. To se provodi na način da se naredbi FILE zadaju izlazni rezultati linearne analize (Linear_buckling_ElementA), koja se izvršava u prvom koraku analize (STEP=1), Slika 8. Prva brojučana oznaka u sljedećem retku označava vlastiti oblik izbočivanja, a u ovom primjeru zadana je vrijednost 1 budući da nas zanima samo prvi oblik izbočivanja. Druga brojučana oznaka predstavlja vrijednost nesavršenosti i zadaje se u postotku debljine lima. Na Slici 9 je prikazan način zadavanja nesavršenosti koja iznosi 10% od debljine hrpta, te odabrana vrijednost iznosi 3,20 mm. Kod daljnje analize ponašanja povećavani su postotci nesavršenosti, što je objašnjeno u sljedećem poglavlju.



Slika 9. Prikaz koda s dodatkom naredbe za uvođenje nesavršenosti u numerički model grede [3]

5. Usporedba rezultata laboratorijskog ispitivanja i numeričke simulacije grede

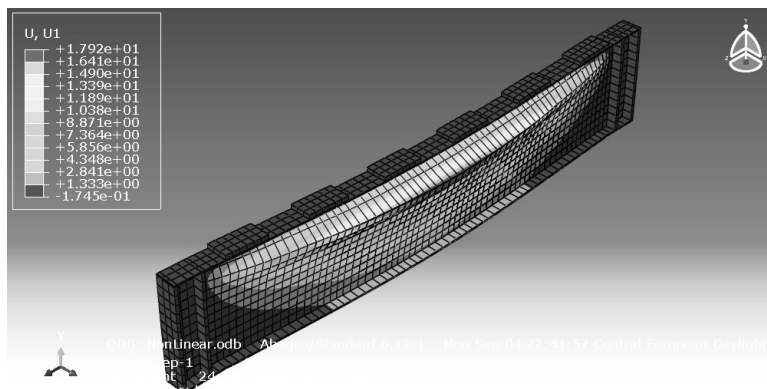
Laboratorijskim ispitivanjem dobiveni su rezultati horizontalnih pomaka hrpta za granično opterećenje neposredno prije nastupanja sloma grede. Horizontalni pomaci panela hrpta grede na trećinama raspona prikazani su na Slici 10 a). Na Slici 10 b) prikazan je odnos opterećenja na preši P u ovisnosti o izbočenju hrpta grede na udaljenosti od 203,2 mm od donjeg ruba gornje pojasnice. Opterećenje P se nanosilo u fazama opterećivanja. Nisu zabilježena značajna izbočenja hrpta kada je opterećenje na preši P bilo cca 33 kN. Međutim, izbočenje hrpta je ubrzano napredovalo nakon opterećenja P od cca 53 kN, kada se opterećenje približilo graničnom opterećenju pri slomu.



Slika 10. Izbočivanje hrpta grede: a) Horizontalni otkloni hrpta na udaljenostima $x = 762, 1524$ i 2286 mm, b) Odnos opterećenja na preši P u ovisnosti o izbočenju hrpta [2]

Pri numeričkim simulacijama grede varirane su vrijednosti nesavršenosti te su dobiveni rezultati uspoređivani s rezultatima laboratorijskih ispitivanja.

Slika 11 prikazuje horizontalne pomake hrpta grede pri zadanoj imperfekciji od 30% debljine hrpta. Skala horizontalnih pomaka (x -os) prikazana je u lijevom gornjem uglu Slike 11, gdje najveća vrijednost iznosi 17,92 mm a najmanja -0,174 mm. Najveći horizontalni pomak se nalazi na udaljenosti 127 mm od donjeg ruba gornje pojasnice. Vertikalni progib grede na sredini raspona iznosi 5,35 mm.



Slika 11. Prikaz horizontalnih pomaka hrpta za vrijednost nesavršenosti od 30% debljine hrpta [3]

Pri nesavršenosti od 40 % t_w horizontalni otklon je manji, a pri nesavršenosti od 30% t_w horizontalni je otklon veći. Greda s početnom geometrijskom nesavršenosti od 30 % t_w daje najbolju podudarnost s rezultatima laboratorijskog ispitivanja (Tablica 2). Horizontalni otklon hrpta grede dobiven numeričkom simulacijom se pri nesavršenosti od 30% debljine hrpta t_w razlikuje za 0,78 % od horizontalnog otklona hrpta dobivenog laboratorijskim ispitivanjem. Vertikalni progib grede dobiven numeričkom simulacijom se pri istoj nesavršenosti razlikuje za 12,15% od vertikalnog progiba dobivenog laboratorijskim ispitivanjem. Razlika između rezultata položaja najvećeg horizontalnog pomaka moguća je zbog primjene gustoće mreže numeričkog modela koja se razlikuje od veličine rastera na kojima su bili postavljeni uređaji pri laboratorijskim mjerenjima pomaka. Osim toga, nepoznavanje svih relevantnih svojstava materijala iz eksperimenta utjecalo je na neprecizno definiranje parametara materijala u numeričkom modelu, što je također moglo utjecati na dobivene rezultate.

Tablica 2. Usporedba laboratorijskih rezultata s rezultatima numeričkih simulacija [3]

Parametri	Numerički rezultati (mm)				Laboratorijski rezultati (mm)
	10 % t_w	20 % t_w	30 % t_w	40 % t_w	
Vertikalni progib	5,55	5,45	5,35	5,27	6,00
Horizontalni otklon	19,26	18,00	17,92	18,36	17,78
Položaj najvećeg horizontalnog pomaka a)	127,00	127,00	127,00	127,00	203,20
a) udaljenost od tlačne pojasnice u y smjeru; sve vrijednosti u mm					

6. Zaključak

Laboratorijskim istraživanjem neukružene grede s tankostjenim panelom hrpta dobivene su informacije o ponašanju hrpta grede pod utjecajem jednoliko raspodijeljenog opterećenja. Numeričkim modeliranjem grede nastojali smo simulirati rezultate dobivene laboratorijskim ispitivanjem te analizirati pojavu lokalnog izbočivanja u pojedinim elementima grede.

Rezultati dobiveni numeričkim simulacijama grede pokazuju vrlo dobro podudaranje s rezultatima laboratorijskog ispitivanja. Pri laboratorijskom ispitivanju došlo je do nesimetričnog izbočivanja na lijevom i desnom kraju grede na prvoj i zadnjoj trećini raspona. Zbog simetrično postavljenog opterećenja i simetrično postavljenih rubnih uvjeta, u numeričkim modelima očekivano su dobiveni simetrični odzivi greda pod utjecajem vertikalnog opterećenja. Do pojave nesimetričnosti rezultata koji su dobiveni laboratorijskim ispitivanjem došlo je zbog moguće nesavršenosti koja je nastala pri postavljanju grede tijekom ispitivanja ili geometrijskih i materijalnih nesavršenosti. Razlika između rezultata laboratorijskog ispitivanja i numeričke simulacije je vidljiva i na mjestu pojavljivanja najvećeg horizontalnog otklona hrpta, što je moguće zbog različito definirane mreže na laboratorijskom uzorku na kojima su mjereni pomaci i gustoće konačnih elemenata na numeričkom modelu. Na laboratorijskom uzorku, mreža na hrptu je imala pet vertikalnih podjela dok je mreža konačnih elemenata u numeričkom modelu bila podijeljena na dvanaest vertikalnih segmenata po visini presjeka grede.

Izbočivanje je pojava koja može uzrokovati nagli slom konstrukcije, što dovodi do potencijalnih ekonomskih gubitaka, čak i gubitaka života. Važno je razumjeti ponašanje izbočivanja ako proračun uključuje vitke konstrukcije izložene tlačnom naprezanju, a to su obično velike čelične konstrukcije mostova, platformi i drugi građevinski objekti.

Literatura

- [1] M. Čaušević and M. Bulić, STABILNOST KONSTRUKCIJA, Zagreb: Golden marketing - Tehnička knjiga, 2013.
- [2] C. Chern and V. Kunapongsiri, "Experiments on Unstiffened Thin Web Girders," *Welding research supplement*, pp. 159-167, 1973.
- [3] Šutić I. "Nelinearna analiza vitkih čeličnih greda. Sveučilište u Rijeci. Građevinski fakultet u Rijeci. Diplomski rad. Rijeka. 2017.
- [4] ABAQUS, "Getting Started with Abaqus Interactive Edition, Version 6.12", "Dassault Systemes, Providence, Rhode Island, USA, 2012.
- [5] ABAQUS, » "Analysis User's Manual I_V, Version 6.12", « Dassault Systemes, Fremont, Calif, USA, 2012.

OPERACIONALNA MODALNA ANALIZA NATHODNIKA MALONJI

OPERATIONAL MODAL ANALYSIS OF OVERPASS MALONJI

Ivana Štimac Grandić*, Tomislav Franković*, Paulo Šćulac*, Toni Komadina*

Sažetak

U radu su prikazani rezultati terenskog dinamičkog ispitivanja pješačkog nathodnika Malonji korištenjem operacionalne modalne analize za određivanje modalnih parametara konstrukcije. Izmjereni modalni parametri uspoređeni su s modalnim parametrima izračunatim na numeričkom modelu nathodnika. Pokazano je da ovom vrstom dinamičkog ispitivanja i obrade podataka moguće dobiti dobro poklapanje između izmjerenih i izračunatih vlastitih frekvencija dok bi za točnije određivanje vlastitih oblika na temelju izmjerenih ubrzanja trebalo uvesti poboljšanja geometrijskog modela u ModalVIEWu boljim rasporedom ili povećanjem broja mjerenih stupnjeva slobode te korištenjem akcelerometara veće osjetljivosti.

Ključne riječi: pješački nathodnik, dinamičko ispitivanje, OMA, ModalVIEW

Abstract

This paper presents the results of an on-site dynamic testing of the pedestrian overpass Malonji using operational modal analysis for obtaining structural modal parameters. The measured modal parameters were compared to the modal parameters calculated on the numerical model of the overpass. It is shown that this type of dynamic testing and data processing can provide a very good match between measured and calculated frequencies. A more accurate determination of modal shapes derived from measured acceleration requires: (i) improvement in the ModalVIEW geometry model, (ii) using a greater number or different positions of accelerometers, (iii) accelerometers with better measuring accuracy.

Key words: pedestrian overpass, dynamic testing, OMA, ModalVIEW

* Građevinski fakultet u Rijeci
E-mail: istimac.tomislav.frankovic.paulo.sculac@gradri.uniri.hr;
toni.komadina@student.uniri.hr

1. Uvod

U radu su prikazani rezultati dinamičkog ispitivanja nathodnika Malonji. Dinamički odziv konstrukcije mjereno je sa šest akcelerometara. Analiza odziva mosta izvršena je u programu ModalVIEW koristeći metodu operacionalne modalne analize (OMA metoda). OMA metoda se može definirati kao postupak modalnog ispitivanja koji omogućuje eksperimentalno određivanje modalnih parametara (vlastitih frekvencija, prigušenja i vlastitih oblika) mjerenjem isključivo dinamičkog odgovora konstrukcije (nije potrebno poznavati parametre pobude). Prednost OMA metode pred, primjerice, metodom eksperimentalne modalne analize (EMA) kod koje je potrebno znati parametre pobude, je u tome što se za provedbu mogu koristiti ambijentalne vibracije (vjetar, promet i sl.), što podrazumijeva jednostavnije i jeftinije provođenje ispitivanja te neometano korištenje konstrukcije tijekom ispitivanja [1,2].

U radu je pokazano da su na terenskom ispitivanju uspješno korišteni hardver i softver za provedbu dinamičkih ispitivanja koje posjeduje Laboratorij za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Rijeci. Na konstrukciji su izmjereni vlastiti oblici vibriranja te pripadne vlastite frekvencije i prigušenja. Dinamički parametri dobiveni terenskim mjerenjima primjenom OMA metode uspoređeni su sa dinamičkim parametrima dobivenim na numeričkom modelu nathodnika Malonji.

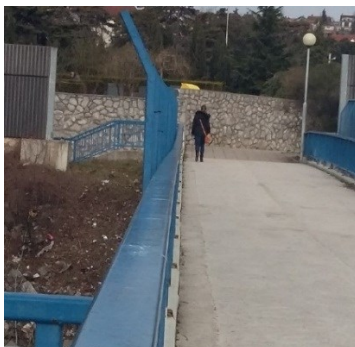
2. Opis konstrukcije nathodnika Malonji

Pješački nathodnik Malonji (Slika 1) premošćuje riječku obilaznicu na km 6+452,00. Udaljen je 640 metara od čvora Dirače u smjeru Zagreba. Nathodnik je izveden kao armiranobetonska okvirna konstrukcija s potporama u obliku trokuta (V stupovi).

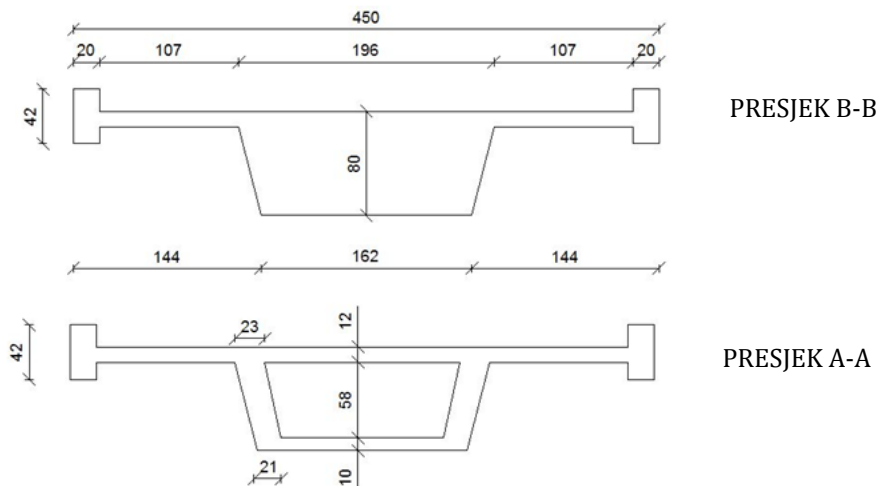


Slika 1. Pogled na most Malonji [3]

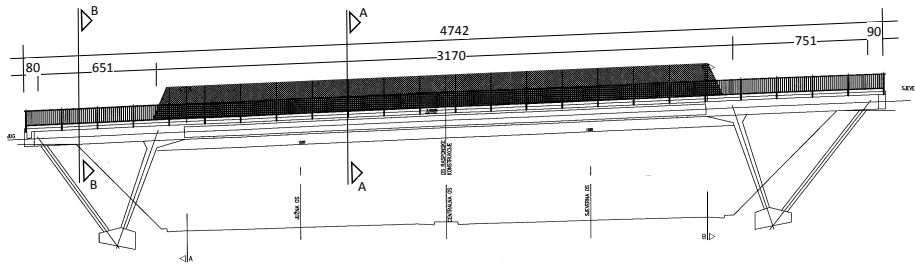
Ukupna dužina mosta iznosi 47,42 m, a ukupna širina 4,50 m. Korisna širina mosta iznosi 4,10 m. Cijelom dužinom pomosta (rasponske konstrukcije iznad stupova) izvedena je čelična ograda visine 1,0 m, a u dužini srednjeg polja izvedena je i zaštitna čelična ograda visine 2,0 m. Na hodnoj površini iznad armiranobetonske konstrukcije pomosta nema dodatnih slojeva (Slika 2). V stupovi su izvedeni tako da su krajnji stupovi, koji su ukopani u nasip, konstantnog punog poprečnog presjeka, dok su unutarnji, vidljivi stupovi promjenjivog punog poprečnog presjeka (Slike 1 i 4). Poprečni presjek rasponske konstrukcije nad stupovima (pomosta) je promjenjiv. U području između V stupova poprečni presjek je puni a u srednjem polju je šuplji (Slika 3). Vanjske dimenzije presjeka jednake su cijelom dužinom pomosta.



Slika 2. Pogled na hodnu površinu nathodnika Malonji [4]



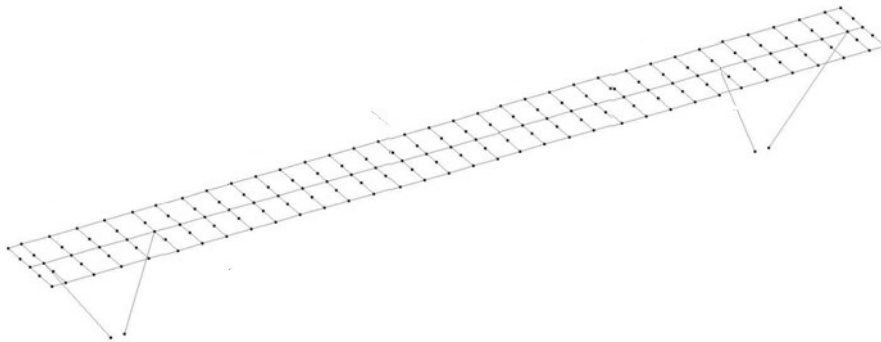
Slika 3. Poprečni presjeci pomosta (gore: puni presjek, dolje: šuplji presjek) [4]



Slika 4. Uzdužni presjek nathodnika [3]

3. Numerički model

Prije ispitivanja konstrukcije potrebno je izraditi numerički model na kojem će se proračunati dinamički parametri koji će se kasnije utvrditi terenskim ispitivanjima. Prednost prethodnog numeričkog proračuna je u tome da se na temelju numerički određenih oblika titranja mogu bolje predvidjeti stupnjevi slobode koji će se mjeriti, čime je olakšana izrada geometrijskog modela koji je podloga za provedbu mjerenja. Iz terenskih mjerenja uporabom OMA metode mogu se odrediti osnovni vlastiti oblici vibriranja i njima pridružene vlastite frekvencije te koeficijenti prigušenja konstrukcije mosta. Proračunom na numeričkom modelu nije moguće dobiti prigušenja, pa će se izračunati vlastiti oblici vibriranja i pripadne vlastite frekvencije konstrukcije mosta.



Slika 5. Numerički model - prikaz štapnog prostornog modela

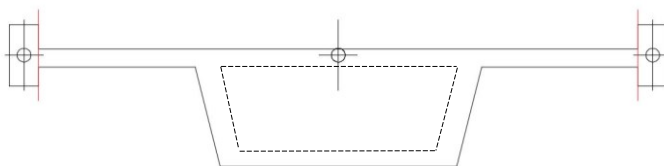
Numerički model izrađen je u programskom paketu STAAD.Pro. Most je modeliran na pojednostavljeni način kao trodimenzionalni štapni model (Slika 5). Model je izrađen od ukupno 246 štapnih elemenata: 4 štapna elementa kojima se modeliraju V stupovi, 102 uzdužnih i 140 poprečnih

štapnih elemenata kojima se modelira pomost. Spoj stupova s temeljem modeliran je kao upeta veza. U modelu su zadana sljedeća svojstva materijala: modul elastičnosti $E=3,3 \cdot 10^7$ kN/m², Poissonov koeficijent $\mu=0,2$ i obujamska težina betona $\gamma=25$ kN/m³.

3.1. Modeliranje geometrije

Potpore konstrukcije, izvedene kao V stupovi, modelirane su s po jednim štapom za svaki stup. Vanjski su stupovi modelirani kao pravokutni poprečni presjek širine 120 cm i visine 30 cm. Dužina vanjskog stupa sa sjeverne strane mosta iznosi 6,77 m, a s južne strane 7,17 m. Unutarnji stupovi V potpora promjenjivog su poprečnog presjeka. Dimenzija presjeka od 140 x 53 cm na spoju elementa s konstrukcijom mosta se prema spoju s temeljem linearno smanjuje do dimenzije 140 x 30 cm. Unutarnji stup na sjevernoj strani mosta dužine je 5,78 m, dok je njegova dužina na južnoj strani mosta 5,89 m. Konačne štapne elemente kojima se modeliraju unutarnji stupovi u programskom paketu STAAD.Pro moguće je definirati geometrijski kao trapezne elemente sa stvarnim dimenzijama na temelju kojih program izračunava geometrijske karakteristike i pridružuje ih pojedinom štapnom elementu [3,4].

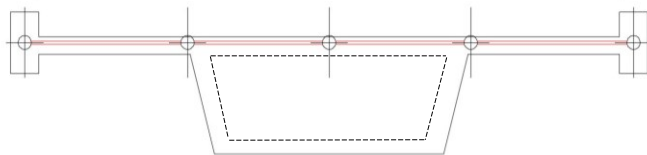
Pomost je u uzdužnom smjeru modeliran konačnim štapnim elementima smještenima u tri uzdužne linije u kojima su koncentrirane mase. Središnja linija smještena je u osi poprečnog presjeka konstrukcije, a štapovi u toj liniji imaju geometrijske karakteristike središnje šupljeg ili punog presjeka i konzola. Druge dvije linije smještene su u osi krajnjih betonskih elemenata (vijenaca), a štapovi u tim linijama imaju geometrijske karakteristike vijenca (Slika 6). Geometrijske karakteristike štapnih konačnih elemenata mogu se naći u [3,4].



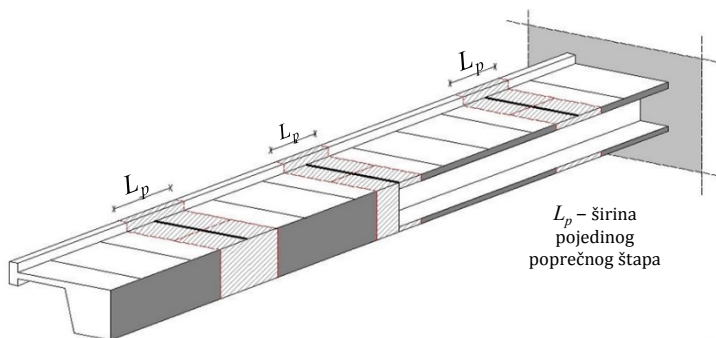
Slika 6. Položaj linija uzdužnih štapnih elemenata pomosta

U poprečnom smjeru pomost se modelira na način da se osim čvorova u osi mosta i u rubnim uzdužnim elementima dodaju čvorovi na mjestima gdje konzola izlazi iz glavnog presjeka, bez obzira radi li se o punom ili šupljem poprečnom presjeku. Spajanjem dobivenih točaka dobivaju se četiri poprečna štapna elementa (Slika 7). Širina pojedinog štapnog konačnog elementa L_p određena je kao polovica udaljenosti između susjednih štapnih

elementa (Slika 8). Geometrijske karakteristike poprečnih štapnih konačnih elemenata mogu se naći u [3,4].



Slika 7. Raspodjela poprečnih štapnih elemenata pomosta



Slika 8. Shema za određivanje geometrijskih karakteristika poprečnih štapnih elemenata [4]

3.2. Modeliranje opterećenja

Za dinamički proračun konstrukcije kojim se izračunavaju vlastite frekvencije i vlastiti oblici vibriranja potrebno je zadati opterećenje od vlastite težine i dodatno stalno opterećenje.

Opterećenja u modelu su definirana na način da u svakome čvoru djeluje opterećenje od vlastite težine koje je jednako u sva tri pozitivna smjera [3,4]. Opterećenja od vlastite težine na štapnim elementima kojima se modeliraju V potpore određena su naredbom „Selfweight“ (program sam računa vlastitu težinu kada se elementu zadaju njegove geometrijske i materijalne karakteristike). Ista naredba nije se mogla primijeniti na model pomosta pa su sile u čvorovima konačnih elemenata od vlastite težine izračunate da se za svaki čvor odredi volumen koji „pripada“ tom čvoru i pomnoži s obujamskom težinom betona. U rubnim čvorovima, uz vlastitu težinu, dodana je i težina zaštitne ograde (uz $g = 0,5 \text{ kN/m}$).

3.3. Rezultati numeričke analize

Na numeričkom modelu opterećenom vlastitom težinom i stalnim dodatnim opterećenjem proveden je dinamički proračun u svrhu

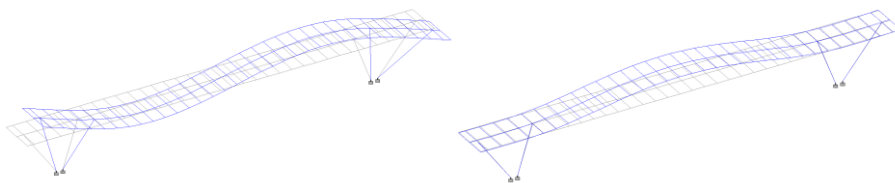
utvrđivanja podatka o vlastitim oblicima vibriranja i pripadajućim frekvencijama.

Izračunate vlastite frekvencije za prvih 15 vlastitih oblika vibriranja prikazane su u Tablici 1.

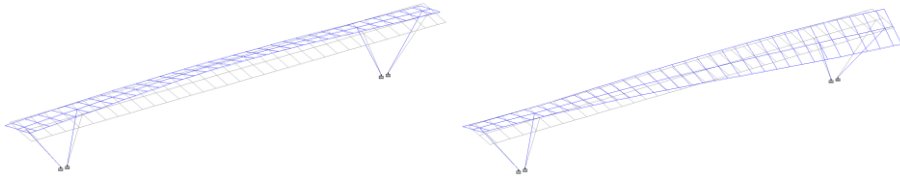
Tablica 1. Izračunate vlastite frekvencije konstrukcije

Broj izračunatog vlastitog oblika	Izračunata vlastita frekvencija [Hz]
1	2,251
2	2,587
3	3,66
4	4,921
5	6,091
6	7,434
7	8,552
8	12,746
9	13,522
10	15,118
11	15,943
12	16,862
13	17,975
14	17,990
15	18,32

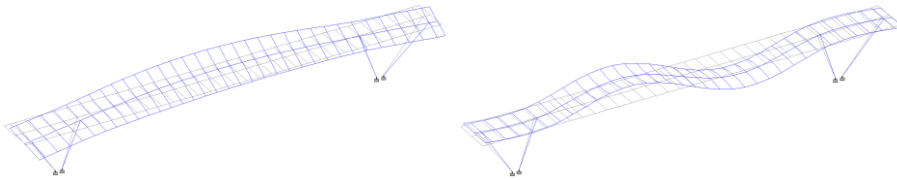
Na Slikama 9 do 16 prikazani su izračunati vlastiti oblici vibriranja.



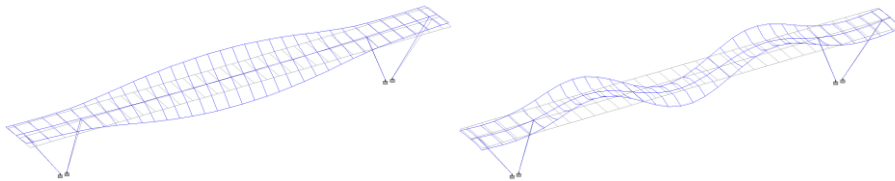
Slika 9. Prikaz prvog i drugog izračunatog vlastitog oblika vibriranja ($f_1=2,251$ Hz; $f_2=2,587$ Hz)



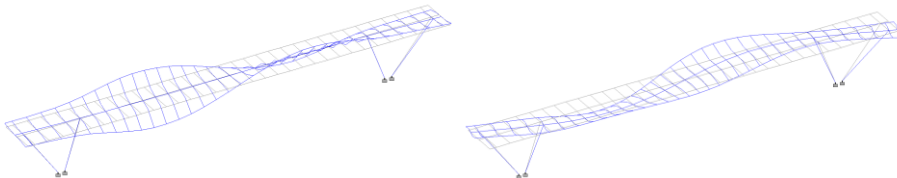
Slika 10. Prikaz trećeg i četvrtog izračunatog vlastitog oblika vibriranja ($f_3=3,66$ Hz; $f_4=4,921$ Hz)



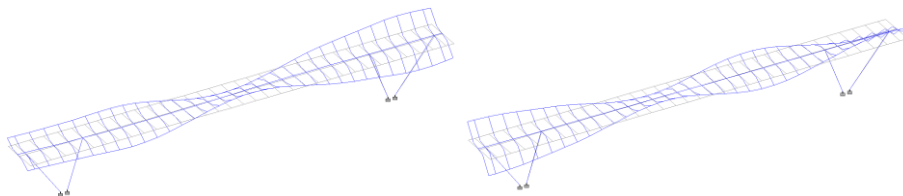
Slika 11. Prikaz petog i šestog izračunatog vlastitog oblika vibriranja ($f_5=6,091$ Hz; $f_6=7,434$ Hz)



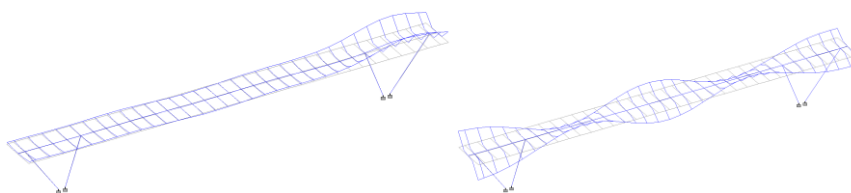
Slika 12. Prikaz sedmog i osmog izračunatog vlastitog oblika vibriranja ($f_7=8,552$ Hz; $f_8=12,746$ Hz)



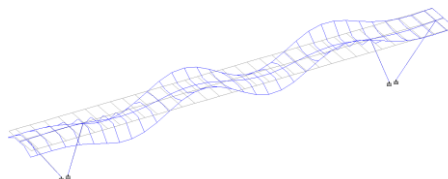
Slika 13. Prikaz devetog i desetog izračunatog vlastitog oblika vibriranja ($f_9=13,522$ Hz; $f_{10}=15,118$ Hz)



Slika 14. Prikaz jedanaestog i dvanaestog izračunatog vlastitog oblika vibriranja ($f_{11}=15,943$ Hz; $f_{12}=16,862$ Hz)



Slika 15. Prikaz trinaestog i četrnaestog izračunatog vlastitog oblika vibriranja ($f_{13}=17,975$ Hz; $f_{14}=17,990$ Hz)



Slika 16. Prikaz petnaestog izračunatog vlastitog oblika vibriranja ($f_{15}=18,32$ Hz)

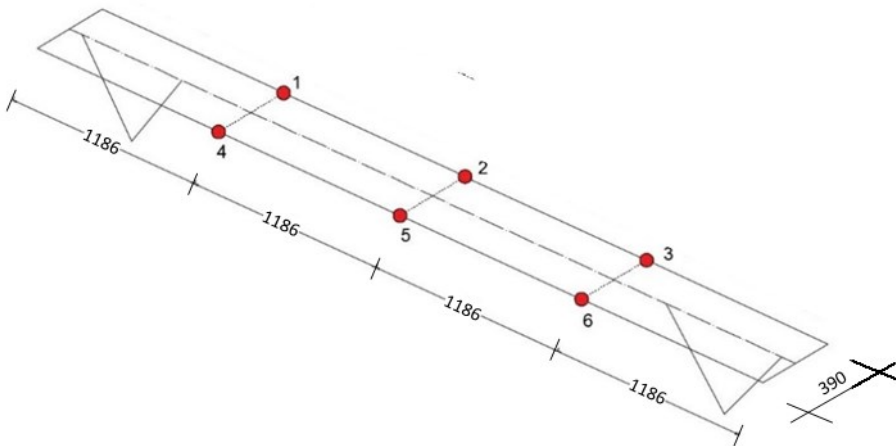
4. Dinamičko ispitivanje nathodnika Malonji

Dana 4. rujna 2017. godine provedeno je dinamičko ispitivanje konstrukcije nathodnika Malonji (Slika 17).

Oprema za ispitivanje sastojala se od prijenosnog računala na kojeg je putem uređaja za kondicioniranje signala bilo spojeno šest jednoosnih akcelerometara osjetljivosti 100 mV/g, a koji se napajao iz prijenosne baterije.



Slika 17. Postavljanje opreme za ispitivanje [3]



Slika 18. Pozicije akcelorometara na mostu (u cm)

Akcelorometri su bili postavljeni u četvrtinama duljine mosta, jednako udaljeni od osi mosta na lijevom i desnom rubu (Slika 18), pričvršćeni za konstrukciju cijanoakrilatnim fleksibilnim ljepilom (Slika 19). Nakon što su svi mjerni instrumenti postavljeni i kalibrirani, povezani su na računalni program ModalVIEW u kojem su ulazni signali obrađivani u realnom vremenu. Jednoosnim akcelorometrima su mjerena ubrzanja u vertikalnom smjeru (vertikalni stupnjevi slobode).



Slika 19. Pričvršćenje akcelerometra na konstrukciju

4.1. Opis rada u programu ModalVIEW

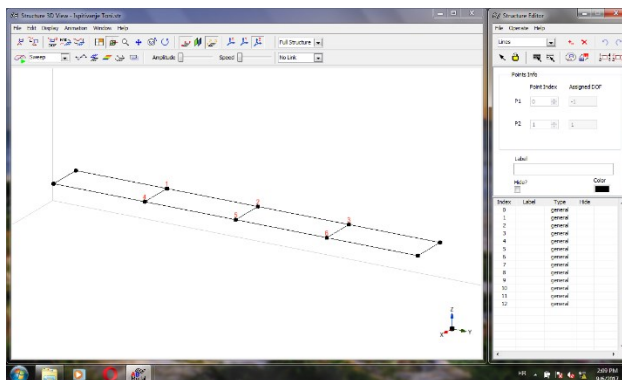
Program ModalVIEW [5] nudi dvije metode prikupljanja i obrade signala iz kojih je moguće odrediti modalne parametre konstrukcije. To su: eksperimentalna modalna analiza (EMA) i operacionalna modalna analiza (OMA). OMA metoda može se definirati kao postupak modalnog ispitivanja koji omogućuje eksperimentalno određivanje modalnih parametara (vlastitih frekvencija, prigušenja i vlastitih oblika) mjerenjem isključivo dinamičkog odgovora konstrukcije pri čemu nije potrebno poznavati parametre pobude, ili ih prikupljati mjerenjem. Stoga je ova metoda bila odabrana za prikupljanje i obradu signala kod provedenog terenskog ispitivanja konstrukcije, koja je pobuđena trčanjem pješaka preko mosta.

Prvi korak u korištenju ModalVIEW platforme je generiranje geometrije konstrukcije u za to predviđenom izborniku. U izborniku je moguće zadati proizvoljan broj točaka („points“) kojima se definiraju položajne koordinate, a koje predstavljaju točke na konstrukciji. Za svaku točku je potrebno definirati snima li se u njoj signal ili ne. Svakoj točki je potrebno definirati stupnjeve slobode, ovisno o njenom položaju na konstrukciji i mogućim pomacima. Točke na mjestima oslonaca u kojima je spriječen pomak u nekom smjeru definiraju se kao nepomične u tom smjeru. Točke se međusobno povezuju linijama da se dobije željeni oblik konstrukcije.

Idući korak je definiranje postavki vezanih za mjerenja: povezivanje ModalVIEWa s uređajem za prikupljanje i kondicioniranje podataka na koji su povezani akcelerometri, definiranje postavki uređaja za prikupljanje i kondicioniranje podataka, odabir kanala na koji su spojeni akcelerometri, definiranje karakteristika akcelerometara, razlučivosti signala i sl.

Nakon podešenih parametara mjerenja, potrebno je definirati parametre i način snimanja signala (vremenski zapis, FRF-EMA, FRF-OMA ili FFT spektar). Tek nakon provedenih svih prethodnih koraka moguće je

započeti ispitivanje, tj. prikupljanje i obradu signala prikupljenih tijekom dinamičkog ispitivanja.

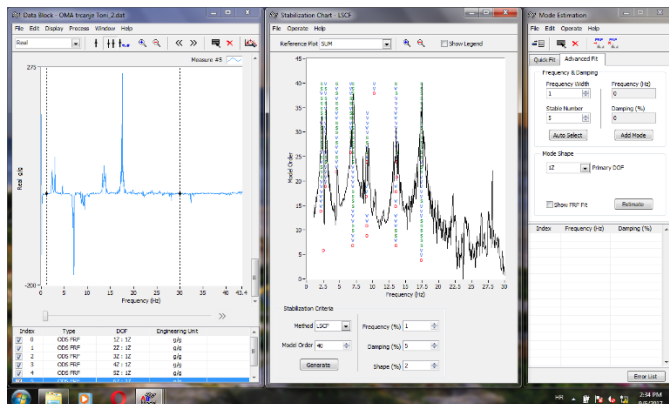


Slika 20. Model konstrukcije u programu ModalVIEW [3]

Za potrebe terenskog ispitivanja mosta Malonji, na kojem su ispitivači prvi puta koristili OMA metodu, u programu ModalVIEW izrađen je vrlo jednostavan geometrijski model koji se sastoji od 10 točaka povezanih linijama na način da tvore konstrukciju pomosta (Slika 20). Točke u kojima se prikuplja signal (položaji akcelerometara) označene su brojevima 1 do 6. Ostale točke predstavljaju mjesta završetka pomosta i definirane su kao nepomične (mjesta oslanjanja pomosta na krajnje stupove V stupova).

Detaljni postupak izrade modela, definiranja potrebnih parametara za prikupljanje i obradu prikupljenih signala može se naći u [3].

ModalVIEW rezultate mjerenja odziva konstrukcije sa svih spojenih mjernih instrumenata spaja i pretvara u jedan, jedinstveni, homogeni rezultat odziva konstrukcije. U izborniku je moguće odabrati više opcija prikaza rezultata. U ovom ispitivanju bilo je potrebno odrediti vlastite oblike vibriranja i njihove pripadne frekvencije i prigušenja pa je korištena opcija „Mode estimation“. Za izdvajanje vršnih vrijednosti dobivenog prikaza signala korištena je opcija „Advanced Fit“ (Slika 21). „Advanced Fit“ metoda koristi stabilizacijske dijagrame iz kojih, pomoću više metoda (LSCF i SSI algoritmi), izolira stabilne vršne vrijednosti te iz njih konstruira vlastite oblike konstrukcije. Program izračunava i prigušenje za svaki vlastiti oblik vibriranja.



Slika 21. Prikaz frekvencijske dekompozicije i stabilizacijskih dijagrama [3]

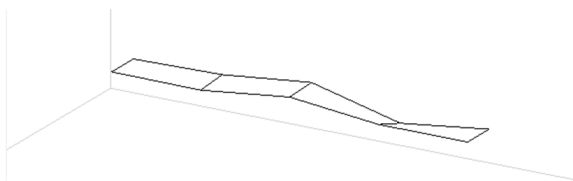
4.2. Rezultati ispitivanja - OMA metoda

Uporabom programa Modalview i primjenom OMA metode za obradu snimljenih signala sa šest akcelerometara izmjerene su vlastite frekvencije konstrukcije mosta i određena pripadna prigušenja (Tablica 2).

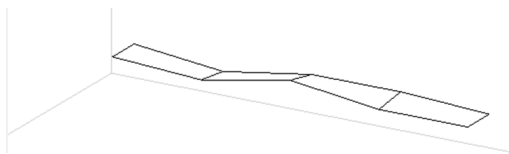
Tablica 2. Izmjerene vlastite frekvencije konstrukcije i prigušenja

Izmjereni vlastiti oblik	Izmjerena vlastita frekvencija [Hz]	Izmjereno prigušenje [%]
1	2,666	2,742
2	7,173	0,967
3	12,81	1,454
4	17,22	0,730

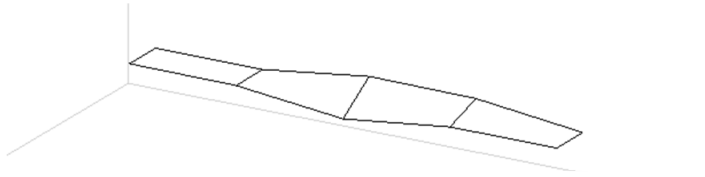
Na Slikama 22 – 25 prikazani su izmjereni vlastiti oblici vibriranja.



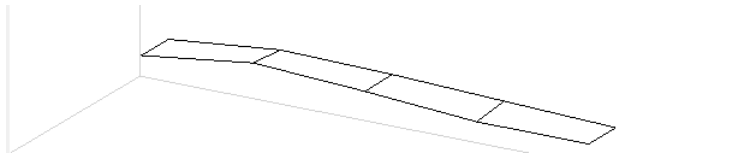
Slika 22. Prikaz prvog izmjenenog vlastitog oblika vibriranja



Slika 23. Prikaz drugog izmjenenog vlastitog oblika vibriranja



Slika 24. Prikaz trećeg izmjenenog vlastitog oblika vibriranja



Slika 25. Prikaz četvrtog izmjenenog vlastitog oblika vibriranja

5. Usporedba rezultata

U Tablici 3 dana je usporedba izračunatih i izmjerenih vlastitih frekvencija mosta Malonji.

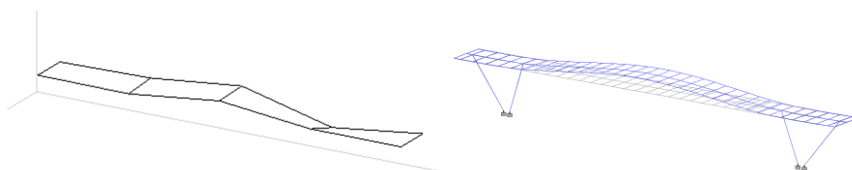
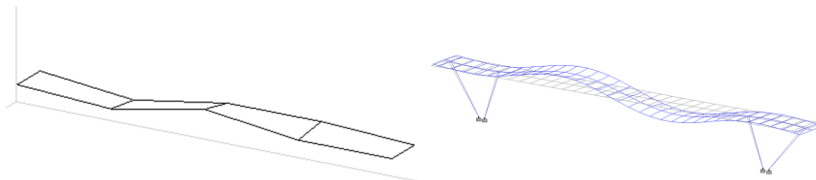
Usporedbom vlastitih frekvencija može se zaključiti sljedeće:

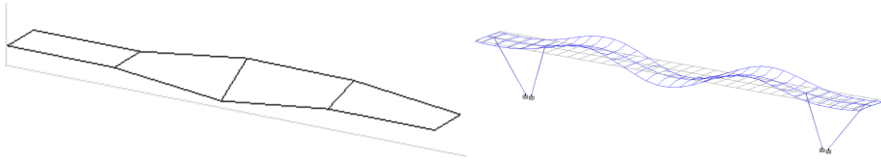
- prvi izmjereni vlastiti oblik frekvencijom je najbliži drugom izračunatom vlastitom obliku vibriranja (odstupanje 3 %)
- drugi izmjereni vlastiti oblik frekvencijom je najbliži šestom izračunatom vlastitom obliku vibriranja (odstupanje 3,5 %)
- treći izmjereni vlastiti oblik frekvencijom je najbliži osmom izračunatom vlastitom obliku vibriranja (odstupanje 3 %)
- četvrti izmjereni vlastiti oblik frekvencijom je najbliži izračunatom dvanaestom vlastitom obliku vibriranja (odstupanje 2,1 %) iako je vrlo blizu i trinaestom i četrnaestom izračunatom vlastitom obliku vibriranja (odstupanje 4,2 % i 4,3 %).

Tablica 3. Usporedba vlastitih frekvencija konstrukcije

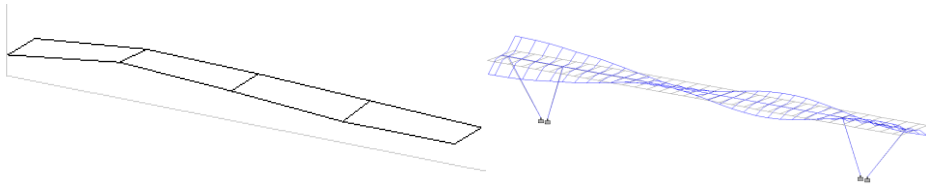
Izračunati vlastiti oblik	Izračunata vlastita frekvencija [Hz]	Izmjereni vlastiti oblik	Izmjerena vlastita frekvencija [Hz]	Razlika izmjerene i izračunate frekvencije [%]
1	2,251	-	-	
2	2,587	1	2,666	3,0
3	3,660	-	-	-
4	4,921	-	-	-
5	6,091	-	-	-
6	7,434	2	7,173	-3,5
7	8,552	-	-	-
8	12,746	3	12,81	0,5
9	13,522	-	-	-
10	15,118	-	-	-
11	15,943	-	-	-
12	16,862	4	17,22	2,1
13	17,975	-	-	-
14	17,990	-	-	-
15	18,320	-	-	-

Poklapanje izmjerenih i izračunatih vrijednosti vlastitih frekvencija konstrukcije mosta Malonji, prikazanih u Tablici 3, svjedoči da izrađen numerički model dobro opisuje stvarno dinamičko ponašanje konstrukcije. Usporedba vlastitih oblika vibriranja može se vidjeti na Slikama 26 – 29.

**Slika 26.** Usporedba prvog izmjenog i drugog izračunatog vlastitog oblika vibriranja**Slika 27.** Usporedba drugog izmjenog i šestog izračunatog vlastitog oblika vibriranja



Slika 28. Usporedba trećeg izmjenenog i osmog izračunatog vlastitog oblika vibriranja



Slika 29. Usporedba četvrtog izmjenenog i dvanaestog izračunatog vlastitog oblika vibriranja

Usporedbom vlastitih oblika vibriranja se može zaključiti sljedeće:

- prvi izmjereni vlastiti oblik djelomično se poklapa s drugim izračunatim vlastitim oblikom vibriranja (u lijevom dijelu poklapanje dobro, u desnom odstupanje),
- drugi izmjereni vlastiti oblik ne poklapa se sa šestim izračunatim vlastitim oblikom vibriranja,
- treći izmjereni vlastiti oblik ne poklapa se s osmim izračunatim vlastitim oblikom vibriranja,
- četvrti izmjereni vlastiti oblik poklapa se s dvanaestim vlastitim oblikom vibriranja.

6. Zaključak

Usporedbom izračunatih i izmjerenih vlastitih frekvencija može se zaključiti da su pri dinamičkom ispitivanju nathodnika Malonji izmjerene vlastite frekvencije drugog, šestog, osmog i dvanaestog vlastitog oblika vibriranja konstrukcije. Odstupanja izmjerenih i izračunanih vlastitih frekvencija su izuzetno mala (od 0,5 % do 3,5 %).

Izmjereni vlastiti oblici vibriranja se samo djelomično poklapaju sa izračunanim oblicima. Razlozi ovakvih odstupanja mogu biti sljedeći:

- mali broj mjernih mjesta (mjerenih stupnjeva slobode)
- prejednostavan geometrijski model u ModalVIEWu (mali broj točaka – stupnjeva slobode, nedostaje geometrija V stupova, točke na kraju pomosta definirane su kao nepomične),

- premala osjetljivost akcelerometara,
- niska razina pobude.

Iz izloženog se može zaključiti da je za ovakvu vrstu konstrukcije potrebno napraviti detaljniji geometrijski model u ModalVIEWu kojim bi se što je moguće bolje obuhvatio geometrijski oblik konstrukcije i rubni uvjeti (postaviti akcelerometre i na osloncima), povećati broj mjerenih stupnjeva slobode (mjerenje i u poprečnom i uzdužnom smjeru), koristiti akcelerometre veće osjetljivosti i po potrebi povećati razinu pobude da bi vlastiti oblici bili što kvalitetnije konstruirani iz izmjerenih podataka na konstrukciji izloženoj dinamičkom djelovanju.

Zahvala. Ovaj rad je dio istraživanja koja se provode u sklopu sveučilišne potpore broj 13.05.1.1.01. U radu se koristila oprema za dinamička ispitivanja nabavljena u okviru projekta Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci (RC.2.2.06-0001), koji sufinanciraju Europski fond za regionalni razvoj (EFRR) i Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta RH.

Literatura

- [1] Avitabile, P. (2001) *Experimental Modal Analysis: A Simple Non-Mathematical Presentation*. <http://www.sandv.com/downloads/0101avit.pdf> (15.10.2017.)
- [2] Rainieri C., Fabbrocino G. (2014) *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures*, New York: Springer
- [3] Komadina T. (2017) *Operacionalna modalna analiza nathodnika Malonji* – diplomski rad, Rijeka
- [4] Rakić I. (2017) *Dinamičko ispitivanje mosta Malonji* - diplomski rad. Rijeka
- [5] ABSignal, Getting Started With ModalVIEW. (2012)

USPOREDBA IZOBARA GLAVNIH NAPREZANJA DOBIVENIH ANALITIČKI I EKSPERIMENTALNO POLARISKOPOM

COMPARISON OF PRINCIPAL STRESS ISOBARS OBTAINED ANALYTICALLY AND EXPERIMENTALLY USING POLARISCOPE

Alen Malagić*, Edita Papa Dukić*

Sažetak

U radu je provedena analiza izobara glavnih naprezanja na jednostavnom primjeru slobodno oslonjene grede. Analiza je provedena na analitički način koristeći se programskim paketom Wolfram Mathematica te na eksperimentalni način pomoću refleksijskog polariskopa. Pojašnjen je princip rada samog polariskopa te je prikazana priprema uzoraka za ispitivanje ovom vrstom polariskopa. Zatim su dane usporedbe rezultata dobivenih analitički i eksperimentalno, kao i krajnji zaključci i prijedlozi za daljnja istraživanja.

Ključne riječi: *naprezanje, glavna naprezanja, polariskop, fotoelasticimetrija, izobare glavnih naprezanja*

Abstract

This paper contain analysis of principal stress isobars on a simple beam subjected to a three-point load. Analysis was conducted analytically using software Wolfram Mathematica and experimentally using reflection polariscope. Furthermore, working principle of polariscope is described and the preparation of samples for testing in reflective polariscope are shown. Comparison of results obtained analytically and experimentally are given as well as final conclusions and suggestions for further research.

Key words: *stress, principal stress, polariscope, photoelasticity, principal stress isobars*

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, R. Matejčić 3, Rijeka
E-mail: alen.malagic@student.uniri.hr, edita.papa@gradri.uniri.hr

1. Uvod

Pojam naprezanje u građevini ima vrlo raširenu primjenu, kako u Nosivim konstrukcijama, tako i u svim drugim granama. Zato je potrebno dobro poznavati naprezanja i način njihove realizacije u napregnutim elementima (poprečnim presjecima). Naši proračuni temelje se na kontroli maksimalnih naprezanja, odnosno glavnih naprezanja unutar najnapregnutijeg poprečnog presjeka u elementu. Stoga je cilj ovoga rada odrediti izobare glavnih naprezanja po visini i dužini napregnutog elementa na dva načina:

- analitički – primjenom formula koje proizlaze iz diferencijalnih jednačbi ravnoteže
- laboratorijskim ispitivanjem pomoću polariskopa

te usporediti dobivene rezultate, čime možemo utvrditi razlike i netočnosti u rezultatima dobivenim laboratorijskim ispitivanjem i analitičkim proračunom i na osnovi toga utvrditi i pojasniti razloge odstupanja, prednosti i mane određivanja izobara pomoću polariskopa.

Ovim radom želi se studentima i drugim zainteresiranima zorno predočiti pojam izobara glavnih naprezanja na puno jasniji, detaljniji i prihvatljiviji način, nego što je to uočeno prilikom pregledavanja razne literature vezane uz takvu tematiku.

2. NAPREZANJA

2.1. Pojam naprezanja

Naprezanje u najjednostavnijem obliku predstavlja kvocijent unutarnje sile u promatranom presjeku F i površine poprečnog presjeka A na koju ta sila djeluje. Stanje naprezanja u nekoj točki definirano je sa 6 komponenti, a prikazujemo ih pomoću tenzora naprezanja. Ovdje su samo navedeni gotovi izrazi koji su korišteni u radu.

2.2. Glavna naprezanja

Glavna naprezanja se javljaju u presjecima gdje su pripadajuća tangencijalna naprezanja jednaka nuli, tj. tamo gdje se smjer vektora punog naprezanja podudara sa smjerom vanjske normale. Takve ravnine nazivaju se glavne ravnine, a normalna naprezanja koja djeluju na tim ravninama i ekstremne su vrijednosti normalnih naprezanja nazivaju se glavna naprezanja. Označuju se kao σ_1 i σ_2 , gdje je σ_1 maksimalno, a σ_2 minimalno naprezanje [1].

Pravci glavnih naprezanja nazivaju se glavnim osima te se još mogu definirati i kao smjerovi glavnih naprezanja [1]. U radu se koristi izraz za određivanje veličine glavnih naprezanja (1):

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{xx}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_{xx}^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (1)$$

gdje su σ_{xx} normalna naprezanja u poprečnom presjeku usmjerena duž osi grede, a τ_{xy} su posmična naprezanja u poprečnom presjeku usmjerena okomito na os grede.

3. EKSPERIMENTALNA ANALIZA NAPREZANJA

3.1. Općenito o eksperimentalnoj analizi naprezanja

U inženjerskoj praksi često se u složenijim konstrukcijama javljaju složena stanja naprezanja kao što su pojave koncentracije naprezanja na rubovima ili kutovima elemenata nepravilnih složenih oblika (razni pogonski dijelovi strojeva, avionska krila....), ili, našoj praksi bliža, pojava koncentracije naprezanja u gredama uslijed zasijecanja greda ili bušenja otvora u istima [3].

Analitičke metode analize naprezanja pogodne su za rješavanje jednostavnijih stanja naprezanja, dok za složenije konstrukcije za vrlo veliki broj problema postupak proračuna analitičkim metodama postaje previše složen i neprikladan za svakodnevno korištenje u inženjerskoj praksi. Stoga se pribjegava korištenju drugih metoda određivanja raspodjele naprezanja [3].

Neke eksperimentalne metode mogu se primijeniti samo na modelima, dok se druge mogu primijeniti i na izvedenim originalnim konstrukcijama. Pojedine metode pogodne su za laboratorijsku primjenu, dok su druge pogodnije za primjenu na terenu. Postoji veliki broj eksperimentalnih metoda analize naprezanja. Mnoge od njih su se razvile u čitave discipline. Neke važnije metode jesu [3]:

- fotoelasticimetrija
- tenzometrija
- metode akustičke emisije
- ostale optičke metode
- metoda rendgenskog zračenja

U ovom se radu za eksperimentalno određivanje trajektorija glavnih napreznja koristimo fotoelasticimetrijom upotrebom refleksijskog polariskopa.

3.2. Fotoelasticimetrija

Fotoelasticimetrija je optička metoda analize napreznja koja iskorištava svojstvo fotoelastičnih materijala da u napregnutom stanju postaju dvolomni. Dvolom je pojava koja se javlja kada zraka svjetlosti prolazi kroz anizotropno sredstvo i pritom se lomi u dvije međusobno okomite linearno polarizirane zrake, a nastaje zbog toga što je brzina širenja svjetlosti u anizotropnim materijalima različita u različitim smjerovima. Veličina dvoloma ovisi o veličini i rasporedu napreznja i može se mjeriti pomoću polariziranog svjetla u polariskopu [3].

3.2.1. Polarizirano svjetlo

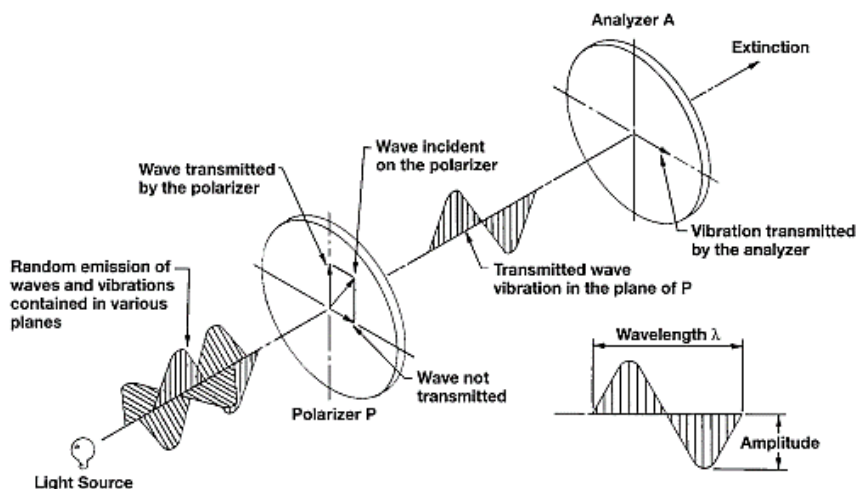
Svjetlosne zrake su elektromagnetski valovi koji su po ponašanju slični radio valovima. Svjetlost se od izvora širi u svim smjerovima. Elektromagnetski valovi titraju u svim ravninama okomitim na smjer širenja svjetlosti [4]. Ukoliko koristimo polaroidni filter, kroz njega će biti propuštena samo jedna komponenta titranja, dok će ostale ravnine iščeznuti, odnosno polaroidni filter propušta samo jednu ravninu titranja svjetlosnih valova i to ravninu koja je paralelna s osi polarizatora. Tako propuštena svjetlost naziva se polarizirana svjetlost. Intenzitet propuštene svjetlosti jest:

$$A_1 = A \cos \alpha \quad (2)$$

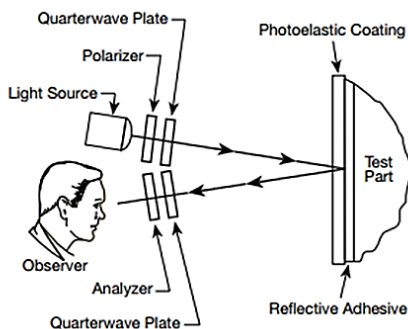
gdje je A intenzitet izvora svjetlosti a α je kut između dva polarizatora. Mjerna jedinica intenziteta svjetla je kandela. Iz izraza (2) možemo zaključiti da će intenzitet svjetla, ukoliko su osi dvaju polarizatora međusobno okomite, biti jednaka nuli. U tom slučaju promatrač vidi tamni analizator (Slika 1) [4].

Na Slici 2 shematski je prikazan način rada reflektirajućeg polariskopa kakvoga koristimo za potrebe ovoga rada. Svjetlost se širi iz izvora svjetlosti kojeg uobičajeno predstavlja žarulja. Svjetlosni valovi se šire i prolaze kroz prvi polaroidni filter u kojemu se svjetlost polarizira. Polarizirano svjetlo širi se do fotoelastične ploče koja je zalijepljena na uzorak pomoću reflektirajućeg adheziva. Fotoelastična ploča napravljena je od posebne plastike. Za razliku od drugih homogenih materijala u stanju napreznja, plastika se ponaša kao optički anizotropan materijal, odnosno uslijed opterećenja dolazi do promjene indeksa refrakcije koji je u funkciji

rezultirajućeg naprezanja. Upravo to svojstvo čini plastiku pogodnom za korištenje u fotoelasticimetriji.



Slika 1. Prolaz polariziranog svjetla kroz analizador kada su polaroidni filteri ukršteni [4]

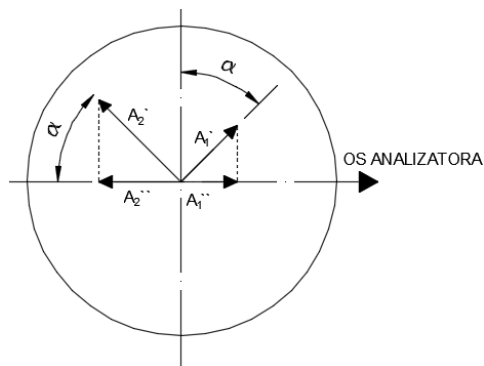


Slika 2. Shematski prikaz rada reflektirajućeg polariskopa [4]

Kada polarizirano svjetlo prolazi kroz fotoelastičnu ploču, vektor svjetlosti se rastavlja i projicira na dvije međusobno okomite komponente. Veličina komponenti vektora svjetlosti odredi se pomoću izraza (2). Kod polariziranog svjetla kakvo se koristi kod ispitivanja polariskopom, vektor svjetlosti je orijentiran na predvidiv način, za razliku od nepolariziranog svjetla kod kojeg je taj vektor orijentiran na slučajan način.

Zrake se od fotoelastične ploče reflektiraju i prolaze kroz analizador čija je optička os vodoravna (Slika 3), tako da će analizador apsorbirati vertikalne projekcije komponenata vektora svjetlosti, a propustiti njihove

vodoravne projekcije A_1 i A_2 [4] budući da polaroidni filter propušta samo jednu ravninu titranja svjetlosnih valova i to onu ravninu koja je paralelna s osi polarizatora.



Slika 3. Rastavljanje vektora svjetla na komponente nakon prolaska kroz analizator [4]

3.2.2. Interpretacija rezultata ispitivanja fotoelasticimetrijom i tamnih mjesta

- **Izokline**

Promatramo li napregnuti model kroz polariskop, na nekim mjestima na modelu uočavamo crne linije, ili pak crna polja. Takve crne linije nazivamo izokline. Ukoliko se prisjetimo poglavlja 3.2.1, gdje smo naveli da, ukoliko su osi polarizatora ukrštene, svjetlost iščezava i ostaje tamno polje, možemo lako zaključiti da crne linije i polja predstavljaju mjesta gdje su pravci glavnih deformacija na modelu paralelni s osi polarizatora te se kao rezultat pojavljuju tamna polja i linije.

Izoklina parametra α predstavlja liniju u kojoj pravci glavnih deformacija (ujedno i pravci glavnih naprezanja) zatvaraju kut α sa proizvoljno odabranom osi x (obično vertikalna os modela.) Izoklinu parametra α dobivamo tako da osi polaroidnih filtera zajedno zaokrenemo za proizvoljan kut α od osi x kako bi zadovoljili uvjet da osi polariskopa budu ukrštene i da možemo dobiti izoklinu. Pomoću izoklina može se odrediti kut koji glavna naprezanja zatvaraju sa koordinatnim osima.

- **Izokrome**

Opterećivanjem se u modelu javljaju deformacije koje se zorno prenose na fotelastičnu ploču. Deformacije u ploči stvaraju odgovarajuće optičke efekte koje pod polariskopom možemo vidjeti kao linije u raznim bojama i nazivamo ih izokromama. Bitno je napomenuti da izokrome predstavljaju linije istih boja.

Nanošenjem opterećenja na model dolazi do pojave naprezanja u modelu, što se očituje u pojavi izokroma. Različita stanja naprezanja koja se

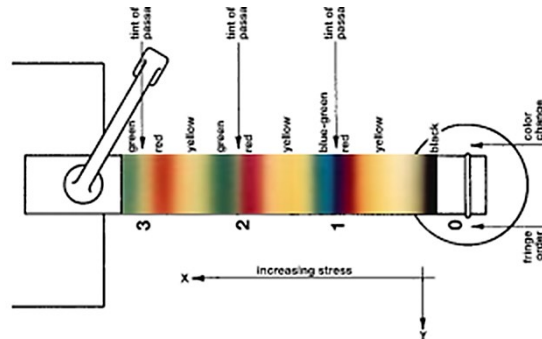
javljaju u modelu u izokromama će se realizirati ne samo u obliku linije izokrome, već i u samoj boji izokrome. Na Slici 4 prikazana je propagacija boja izokroma ovisno o veličini realizirane deformacije. Boje koje su definirane na Slici 4 su komplementarne boje proizašle iz isključivanja pojedinih boja iz spektra bijele svjetlosti uslijed pomaka u fazi i valnoj duljini svjetlosnog vala. Zbog toga možemo primijetiti da se neke boje pojavljuju više puta, ali s različitim kontrastom kao rezultat isključivanja najprije jedne boje, a zatim više različitih boja iz spektra bijele svjetlosti zbog povećanja pomaka u fazi između dva vala u analizatoru. Iz Slike 5, možemo definirati veličine naprezanja promatrajući boje izokroma dobivenih iz polariskopa.

Pomoću Slike 5 možemo zornije prikazati promjenu izokroma u spektru boja ovisno o promjeni veličine naprezanja. Na Slici 5 tlocrtno je prikazana konzolna greda opterećena koncentriranom silom na slobodnom kraju. Možemo primijetiti da sa porastom naprezanja prema upetom kraju grede izokrome na gredi mijenjaju boju prema redu kakav je uspostavljen u tablici na Slici 4. Tako, na primjer, crna boja označava neopterećena područja modela, dok zelena boja označava područja najvećega naprezanja. Izokrome razlikujemo po boji, ali i po redu izokrome, kako je navedeno u krajnjem desnom stupcu Slike 4 („Fringe order“).

Izokrome se uvijek javljaju u kontinuiranom redosljedu, što znači da, ukoliko identificiramo izokrome prvog i trećeg reda, možemo zaključiti da se izokroma drugog reda nalazi između [4]. Slijed boja koje se pojavljuju u izokromama uvijek se uspostavlja prema redu utvrđenom na slikama 4 i 5, ovisno o porastu ili smanjenju naprezanja.

COLOR	APPROXIMATE RELATIVE RETARDATION		FRINGE ORDER N
	nm	in $\times 10^{-6}$	
Black	0	0	0
Pale Yellow	345	14	0.60
Dull Red	520	20	0.90
Red/Blue Transition	575	22.7	1.00
Blue-Green	700	28	1.22
Yellow	800	32	1.39
Rose Red	1050	42	1.82
Red/Green Transition	1150	45.4	2.00
Green	1350	53	2.35
Yellow	1440	57	2.50
Red	1520	60	2.65
Red/Green Transition	1730	68	3.00
Green	1800	71	3.10

Slika 4. Redosljed pojavljivanja izokroma [4]



Slika 5. Propagacija izokroma na konzoli opterećenoj na slobodnom kraju [4]

Kod pokusa u kojem opterećenje na element povećavamo u inkrementima, izokrome nam mogu pokazati područja elementa koja su kritična i ona koja su manje iskorištena jer se izokrome najprije pojavljuju na najkritičnijim područjima, s porastom opterećenja šire se prema područjima koja su manje opterećena (tamna područja), dok na kritičnim mjestima nastaju nove izokrome viših redova [4].

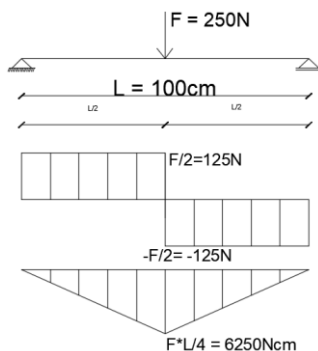
4. NUMERIČKI PRIMJER

4.1. Općenito o numeričkom primjeru

U ovom poglavlju prikazat će se postupak i rezultati postavljenog numeričkoga primjera kojim ćemo obuhvatiti područje naprezanja i fotoelasticimetrije. Numeričkim primjerom prikazat ćemo raspodjelu naprezanja po dužini i visini opterećene grede. Raspodjelu naprezanja prikazujemo izobarama naprezanja. Numerički primjer riješen je analitičkim i eksperimentalnim putem s naglaskom upravo na eksperimentalni dio. Zadatak je analitički riješen koristeći programski paket Wolfram Mathematica. Također je dan proračun u komercijalnom programu koji koristi metodu konačnih elemenata.

4.1. Opis zadatka

Drvena letvica širine $b = 10 \text{ mm}$ i visine $h = 40 \text{ mm}$ slobodno je oslonjena na osnom razmaku $L = 1 \text{ m}$ i opterećena koncentriranom silom od 250 N na sredini raspona (Slika 6).



Slika 6. Statička skica grede i pripadajuće rezne sile.

Moment tromosti poprečnog presjeka izračunat je prema:

$$I_y = \frac{b h^3}{12} = \frac{4^3}{12} = 5.33 \text{ cm}^4$$

Statički moment površine pravokutnog poprečnog presjeka dan je sa:

$$S_y = \frac{b}{2} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right) \quad (3)$$

gdje veličina z predstavlja udaljenost od težišta poprečnog presjeka.

Tangencijalna naprezanja izračunata su prema izrazu

$$\tau_{xy} = \frac{T S_y}{I_y b} = T \left(\frac{3}{2 b h} - \frac{6 z^2}{b h^3} \right) \quad (4)$$

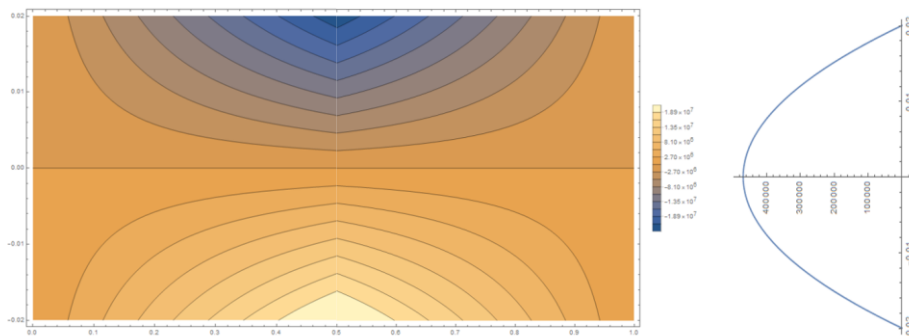
gdje je T poprečna sila u promatranom presjeku.

Normalna naprezanja izračunata su prema

$$\sigma_{xx} = \pm \frac{M_y z}{I_y} \quad (5)$$

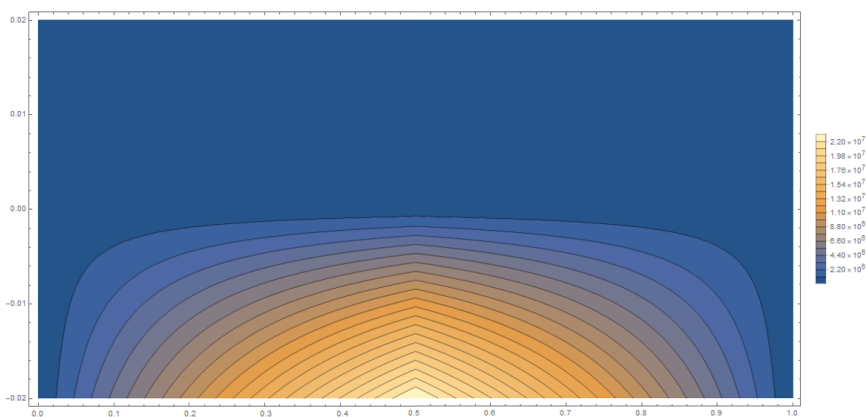
gdje je M_y moment savijanja u promatranom presjeku.

Raspodjela normalnih naprezanja po visini i dužini grede i raspodjela posmičnih naprezanja po visini grede dana je na Slici 7.

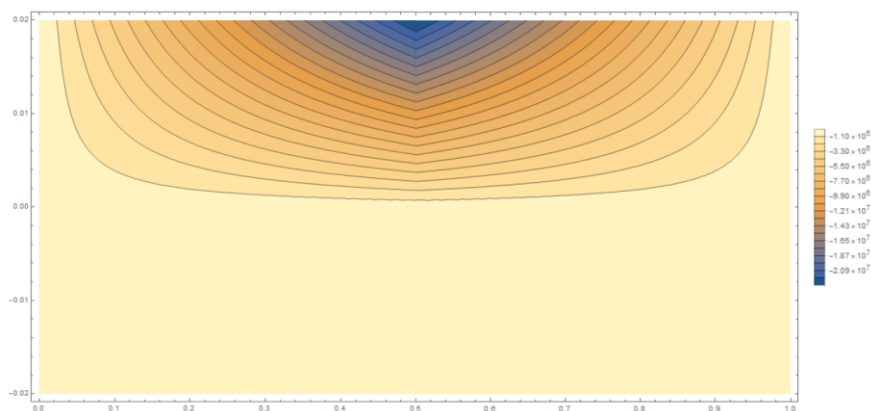


Slika 7. Raspodjela normalnih naprezanja po dužini i visini grede (lijevo) i raspodjela posmičnih naprezanja po visini grede (desno) $[\frac{N}{mm^2}]$.

Glavna naprezanja računata su prema (1). Mjesta na kojima se pojavljuju iste vrijednosti glavnih vlačnih i tlačnih naprezanja povezuju linije koje zovemo izobarama vlačnih/tlačnih naprezanja i dana su na Slikama 8 i 9.



Slika 8. Izobare glavnih vlačnih naprezanja po dužini i visini grede $[\frac{N}{mm^2}]$.



Slika 9. Izobare glavnih tlačnih naprezanja po dužini i visini grede [$\frac{N}{mm^2}$].

4.4. Izobare glavnih naprezanja

Izobare glavnih naprezanja predstavljaju krivulje koje spajaju točke jednakih veličina glavnih naprezanja na napregnutom elementu. Izobare glavnih naprezanja definirane su samo veličinom glavnog naprezanja, ali ne i smjerom glavnog naprezanja. Bitno je napomenuti da izobare naprezanja nisu isto što i trajektorije naprezanja budući da linije izobara nisu i ne moraju biti tangente na krivulje glavnih naprezanja.

4.5. Eksperimentalno ispitivanje

4.5.1. Priprema uzorka za ispitivanje

Postupak započinje izrezivanjem ploče od posebne plastike na komade čije dimenzije odgovaraju uzorku kojeg ispitujemo. Fotoelastična plastika oznake *PS-3A* odabrana je prema uputama proizvođača [5]. U našem slučaju ploču smo izrezali na 4 komada dimenzija $4 \times 25 \text{ cm}$ (Slika 10). Izrezane komade plastike, kao i samu gredu, potrebno je zatim oprezno očistiti vatom natopljenom alkoholom kako bi se uklonile eventualne nečistoće i prašina.



Slika 10. Komad posebne plastike dimenzija $4 \times 25 \text{ cm}$.

Nakon pripreme plastike slijedi priprema adheziva *PC-6* [5] pomoću kojega lijepimo plastiku za drvenu gredu. Dvokomponentni adheziv se priprema tako da komponente najprije maseno doziramo u omjeru 1:1.

Proizvođač je propisao potrebnu masu adheziva po jedinici površine na temelju čega je za potrebnu površinu od 400 cm^2 izračunato da je potrebno 50 g adheziva, odnosno 25 g učvršćivača (Hardener) te 25 g posebne smole (Resin). Dozirane komponente se zatim zagrijavaju na ploči na propisanu temperaturu od 45°C . Nakon što se postigne tražena temperatura, komponente se zajedno miješaju 3-5 minuta dok se ne postigne homogena smjesa odgovarajuće temperature budući je kemijska reakcija vezivanja učvršćivača i smole egzotermna.

Adheziv kistom nanosimo na drvenu gredu u sloju debljine 1 mm . Nakon nanošenja adheziva, komade plastike oprezno postavljamo na gredu tako da su rubovi plastike i grede poravnati. Plastiku zatim oprezno i nježno pritišćemo kako bi istisnuli sve mjehuriće zraka zarobljene između adheziva i plastike i ostvarili potpunu i kvalitetnu vezu između istih. Takvu gredu potrebno je ostaviti 24 h u mirovanju kako bi se adheziv osušio i greda bila spremna za ispitivanje pod polariskopom. Greda gotova za ispitivanje prikazana je na Slici 11.



Slika 11. Greda gotova za ispitivanje.

4.5.2. Ispitivanje grede

Postupak ispitivanja započinjemo postavljanjem grede u okvir na kojem smo prethodno pričvrstili oslonce na zadanom razmaku. Greda se zatim dodatno stabilizira kako bi se spriječila pojava bočne nestabilnosti, a koncentrirano opterećenje u sredini raspona nanoseno je pomoću uređaja za nanošenje sile koji ujedno mjeri intenzitet nanosene sile (Slika 12). Polariskop je pozicioniran prema uputama proizvođača tako da je izvor svjetlosti okomit na plohu grede, a udaljenost polariskopa od grede iznosi 200 cm .



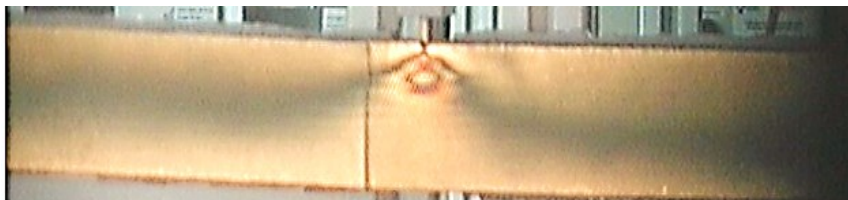
Slika 12. Gotova greda za ispitivanje.

Postepenim nanošenjem opterećenja uzorak se deformira. Na analizatoru očitavamo pojavu izokroma i izoklina, kao i njihove pripadajuće boje, odnosno redove.

Na Slici 13 u sredini raspona na mjestu nanošenja sile mogu se primijetiti polja izokroma čije boje se kreću od svijetlo žute (0.6) do svijetlo zelene (1.22), gdje broj u zagradi označava red izokrome. Udaljavajući se od točke nanošenja opterećenja dolazi do pojave crnih polja (0) koja predstavljaju mjesta koja nisu napregnuta. Oblik i boja, odnosno red izokroma u točki nanošenja opterećenja upućuju na izrazitu koncentraciju i složenu raspodjelu naprezanja u tom području.

Udaljavajući se od sredine raspona prema osloncima dominantno je tamno polje (crna izokroma), uz izuzetak na rubovima greda gdje su naprezanja najveća pa dolazi do slabog odmaka prema svijetlo žutoj izokromi. Razlog što su izokrome tako slabo vidljive u tom području možemo potražiti između nekoliko faktora:

- velika krutost grede
- neadekvatno sprječavanje bočne nestabilnosti zbog čega dolazi do bočnog izvijanja
- izobare se teže vide na niskim gredama



Slika 13. Greda podvrgnuta opterećenju od 243 N.

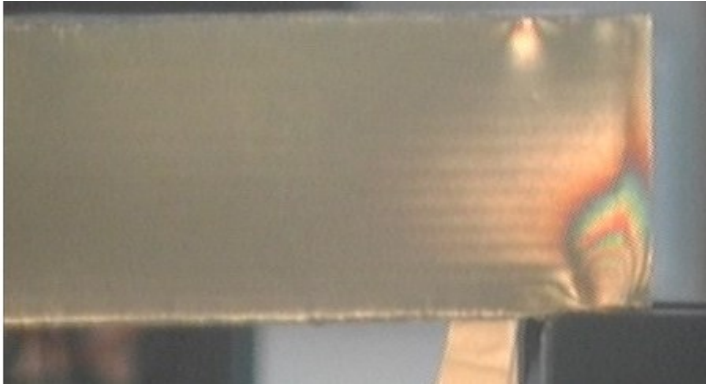
Daljnijim povećanjem opterećenja, na Slici 14 može se uočiti pojačavanje koncentracije naprezanja kao i žute boje na rubovima grede i postepeno smanjivanje tamnog polja. Daljnijim povećanjem opterećenja, izokroma (0) bi se smanjivala prema središtu presjeka grede.



Slika 14. Greda podvrgnuta opterećenju od 291 N.

Na samom mjestu oslanjanja ponovo dolazimo do zanimljivog otklona u izobarama glavnih naprezanja dobivenim putem polariskopa i onih dobivenih analitički. Koncentracija naprezanja jasno je vidljiva na Slici 15, a

rezultirajuće izokrome kreću se od svijetlo žute (0,60) sve do crvene boje (2,65).

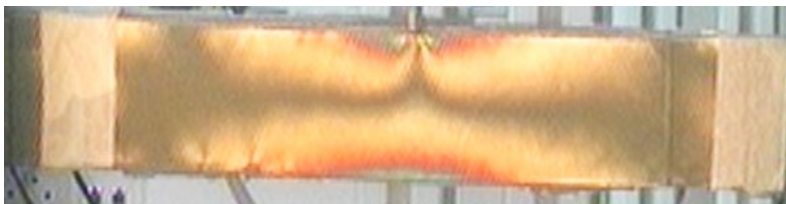


Slika 15. Greda podvrgnuta opterećenju od 291 N- područje oslonca.

Zbog nedostatka adekvatne opreme kojom bi se greda bolje učvrstila, oslonila i na kraju preciznije opteretila, maksimalna sila kojom je greda opterećena iznosi 291 N. Pri tom stanju naprezanja izokrome jednostavno nisu dovoljno vidljive da bi se iz njih mogla kvalitetno odrediti raspodjela naprezanja u gredi, niti potvrditi rezultati dobiveni analitičkom analizom.

Kao zamjenski sustav korištena je skraćena greda raspona 25 cm, od posebne reflektirajuće plastike. Dimenzije poprečnog presjeka iznose 3×40 mm. Sama plastika je vrlo mekana i ima malu krutost, što je povoljno za jasnoću izokroma i jednostavnost ispitivanja, ali mana takvog materijala jesu velike zaostale deformacije. Sama greda oslonjena je na prijašnju gredu kako bi izokrome bile vidljive. Zamjenska greda pričvršćena je za drvenu gredu pomoću ljepljive trake. Stoga u daljnjim slikama na zamjenskoj gredi neće doći do pojave tako izražene koncentracije naprezanja u području oslanjanja kao u prethodnom primjeru.

U prvom koraku opterećenja, na Slici 16 možemo uočiti već tri para izokroma, od svijetlo žute do prijelazne crveno plave izokrome (1). Također možemo primijetiti, kao i kod prijašnje grede, da na mjestu unosa sile dolazi do pojave koncentracije naprezanja.



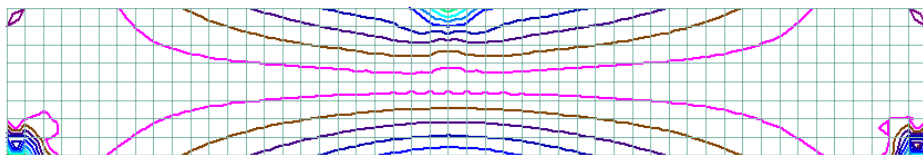
Slika 16. Zamjenska greda podvrgnuta opterećenju, prvi korak opterećenja.

U drugom koraku dodavanja opterećenja, na gredi možemo uočiti kako se pojavljuju nove izokrome dok se prijašnje izokrome potiskuju prema središtu grede. Izokrome se ne šire samo prema središtu, već i u dužinu, prema samim osloncima. Ukoliko se u trećem poglavlju prisjetimo kako se izokrome pojavljuju i šire, možemo lako zaključiti koja su područja grede kritična, a koja su neiskorištena. Na Slici 17 možemo uvidjeti kako se počinju nazirati i koncentracije naprezanja na improviziranim ležajima u kutovima zalijepljene trake. Vrlo je bitno napomenuti da bi se daljnjim opterećivanjem drvene grede u prethodnom primjeru uz adekvatnu opremu dobio jednaki oblik izokroma, odnosno raspodjele naprezanja u gredi, kao u primjeru zamjenske grede.



Slika 17. Zamjenska greda podvrgnuta opterećenju, treći korak opterećenja.

Budući u radu koristimo grednu teoriju koja nije u stanju prepoznati koncentracije naprezanja te time nismo u mogućnosti validirati analitičke i eksperimentalne rezultate, dodatno je napravljen model u programskom paketu STAAD.Pro sa pločastim konačnim elementima, a rezultati su prikazani na Slici 18.



Slika 18. Prikaz izobara naprezanja na modelu grede u programskom paketu STAAD.Pro.

5. Zaključak

Cilj ovoga rada je prikazati izobare glavnih naprezanja dobivenih analitičkim putem i eksperimentalnim putem. Uspoređujući rezultate možemo potvrditi da se izobare glavnih naprezanja dobivene analitičkim putem i eksperimentalnim putem podudaraju u područjima između oslonaca i mjesta unosa koncentrirane sile (središte raspona). Na mjestima unosa opterećenja ili oslanjanja, u eksperimentalnom djelu primjera uočena

su složena stanja naprezanja (koncentracija naprezanja) te veliki otklon u rezultatima u odnosu na dobiveno analitičko rješenje. Takvi rezultati su i očekivani budući u analitičkom proračunu koristimo grednu teoriju koja nije u stanju prepoznati postojanje normalnih naprezanja okomitih na os nosača koja se javljaju na osloncima i na mjestu unosa koncentrirane sile. Klasična teorija kontinuuma u ravnini prepoznaje takvu koncentraciju naprezanja, što je i potvrđeno modelom grede napravljenom u programskom paketu STAAD.Pro.

Eksperimentalne metode pogodne su za korištenje u složenim konstrukcijama kada su analitički postupci ili previše složeni ili nepouzđani zbog primjene neodgovarajuće teorije ili nepostojanja adekvatne teorije. U takvim konstrukcijama, fotoelasticimetrija, osim raspodjele naprezanja, može uvelike pomoći u otkrivanju preopterećenih ili neopterećenih dijelova konstrukcije i time pomoći inženjeru u oblikovanju ekonomičnije konstrukcije.

Ovaj rad daje veliki doprinos prvenstveno budućim studentima na kolegiju Otpornost materijala II kojima će ovaj rad uvelike pomoći u savladavanju pojma glavnih naprezanja i raspodjele naprezanja u jednostavnijim elementima. Daljnji cilj ovoga rada je i potaknuti na daljnja istraživanja u području fotoelasticimetrije.

Zahvala. *Ovaj je članak rezultat rada u okviru projekta Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci(RC.2.2.06-0001) koji je sufinanciran iz Europskog fonda za regionalni razvoj (EFRR) i Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH (This work has been supported in part by Ministry of Science, Education and Sports of the Republic of Croatia under the project Research Infrastructure for Campus-based Laboratories at the University of Rijeka, number RC.2.2.06-0001. Project has been co-funded by the European Fund for Regional Development (ERDF)).*

Literatura

- [1] V. Šimić, *Otpornost materijala I*, Školska knjiga, Zagreb, 2002.
- [2] F. P. Beer, E. Russel Johnston, Jr, J. T. Dewolf and D. F. Mazurek, *Mechanics of Materials*, McGraw-Hill, New York, 2009.
- [3] Alfirević, *Nauka o čvrstoći I*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1989.
- [4] Tech note TN-702-2, Vishay Micro-Measurements
- [5] Tech note TN-704-2, Vishay Micro-Measurements

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF STRUCTURE RESPONSE TO NON-UNIFORM SUPPORT EXCITATION

EKSPERIMENTALNA ANALIZA ODZIVA GREDNOG NOSAČA NA NEJEDNOLIKU POBUDU OSLONACA

Simona Dobrilla*, Nina Čeh*, Miran Tuhtan*, Gordan Jelenić*

Abstract

Experimental testing of the dynamic response of a simply supported beam model with discrete masses has been carried out. The range of excitation amplitudes for which the response is linear have been determined. The experimentally obtained displacements are presented for the case of harmonic uniform and non-uniform excitation, as well as for the simulation of the Northridge earthquake, which could be used as experimental benchmarks for multiple support excitation.

Key words: *dynamic analysis, non-uniform earthquake excitation, shake tables, optical displacement measurement, beam structures*

Sažetak

Provedeno je eksperimentalno ispitivanje dinamičkog odziva modela slobodno oslonjene grede s dodatnim koncentriranim masama. Određene su amplitude pobude unutar kojih je odgovor grede linearan. Prikazani su eksperimentalno dobiveni rezultati za pomake grede prilikom harmonijske jednolike i nejednolike pobude te prilikom simulacije Northridge potresnog zapisa, koji se mogu koristiti kao eksperimentalni benchmark primjerci za nejednoliku pobudu oslonaca.

Ključne riječi: *dinamička analiza, nejednolika potresna pobuda, potresne platforme, optičko mjerenje pomaka, gredne konstrukcije*

*University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: simona.dobrilla@gmail.com, {nina.ceh,miran.tuhtan,gordan.jelenic}@uniri.hr

1. Introduction

In regions where earthquakes are prevalent, the main concern is determining the structural response to earthquake-induced motion of the base of the structure. Unlike uniform excitation, where all the supports undergo an identical ground motion and move as one rigid base, when non-uniform excitation is applied for the same travelling seismic wave, each support will receive different ground motion input [1].

For long-span structures, such as bridges and dams, or structures built on significantly varying soil types, earthquake induced multi-support excitation may greatly affect overall dynamic response of structures. This introduces a response case, which is usually not taken into account in the assessment of dynamic response of structures. In the extreme case, this could lead to failure due to excessive relative displacements of the supports.

During the past 30 years, many experts in the field of structural dynamics, such as Chopra [2] and Clough & Penzien [3], to mention only a couple of well-known sources, have been studying the response of structures under spatially variable ground movement and provided theoretical background, along with the solution methods for the case of multi-support excitation. At the same time, many other researchers, such as Harichandran & Wang [4] and Nazmy & Abdel-Ghaffar [5], have been working on the numerical analysis of seismic behavior of long-span bridges subject to such excitation.

Even though this field has become quite attractive to many researchers in the last decades, few experimental studies have been carried out. One of the first test studies was conducted at the University of California, Berkeley, using a single shake table to simulate the 1971 San Fernando earthquake on a bridge-scale model [6]. However, in order to simulate non-uniform excitation, a system of multiple shake tables is required. Very few institutions own more than one shake table [7], but one of them is the University of Rijeka (Faculty of Civil Engineering), owning two biaxial shake tables, which allow conducting experiments on models subject to non-uniform ground motions [8].

An experimental programme with the main objective of examining the dynamic behavior of simply-supported beams to multiple support excitation is here designed and carried out. The practical limitations of conducting such experiments that could be used to validate linear dynamic analysis are discussed, and experimental benchmark cases for six different excitations are given.

2. Experimental setup and model description

A special experimental setup has been designed to examine the dynamic behavior of small-scale one-dimensional structures with two supports subjected to both uniform and non-uniform excitation.

2.1. Model

A wooden beam of 2.0 m length and a cross section of 46.4 by 12.8 mm is used. Its density is 0.5792 g/cm³, mass is 688 g, and Young's modulus is 12.78 GPa. For the simply supported case and with weights of 8 N attached to the quarters of its span, its natural frequencies calculated using modal analysis from [2] and corresponding shapes are given in Table 1.

Table 1. Natural frequencies of the beam model

Mode	Natural frequency	Shape
1 st	18.026 rad/s (2.869 Hz)	
2 nd	72.957 rad/s (11.611 Hz)	
3 rd	157.188 rad/s (25.017 Hz)	

2.2. Excitation and measuring system

The beam is placed on a unique system of two biaxial shake tables Quanser STI-III (Figure 1), which are used to excite it. All the measurements are obtained by means of accelerometers connected to the shake tables and a non-contact optical measuring system GOM Aramis and Pontos (version 6.3 and 8.0). All the experiments are filmed with full resolution (2400x1728 pixels) and 160 frames-per-second (fps), with measurement accuracy of 0.2 mm.

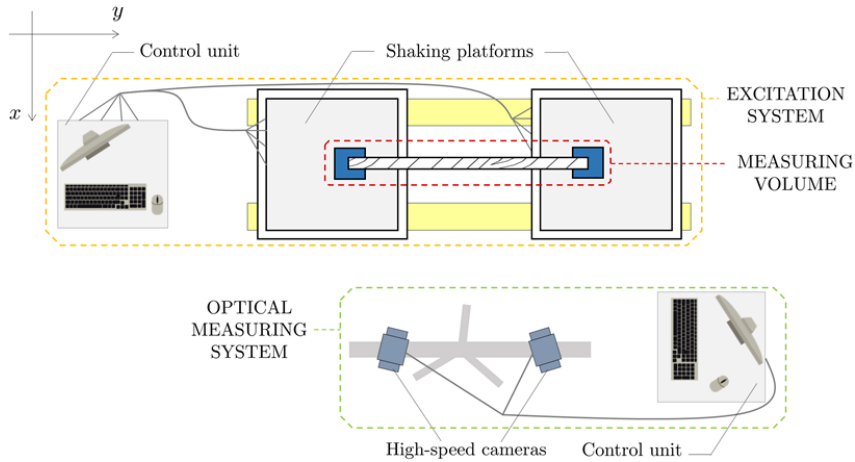


Figure 1. Top view of the experimental set-up

3. Results and discussion

A series of preliminary tests on a SDOF cantilever beam is performed at the beginning in order to measure the properties of the system, as well as to detect the optimal amplitude of the excitation function that will trigger only linear response.

The dynamic response of the MDOF beam described in Section 2 is analyzed for six different excitation conditions: three synchronous excitations designed to excite the symmetric modes of vibration, and three asynchronous excitations designed to test the asymmetric modes of vibration.

3.1. SDOF cantilever beam tests

The purpose of the tests carried out on a SDOF cantilever beam (Figure 2) is to determine the damping ratio and the boundary values of excitation amplitudes needed to avoid the non-linear effects in the response.

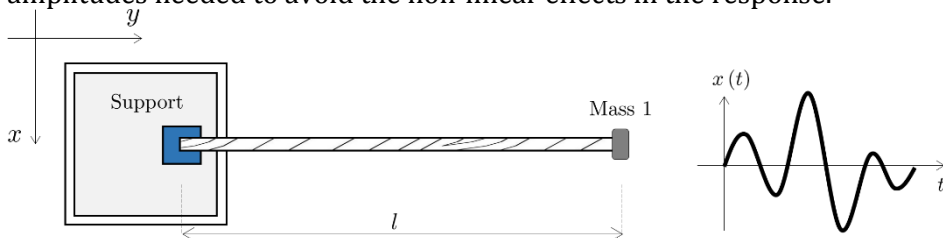


Figure 2. Top view of the experimental set-up with a SDOF beam

3.1.1. Damping ratio determined from free oscillation tests

The system is initially moved from the equilibrium position and released to oscillate with its natural frequency (Figure 3).

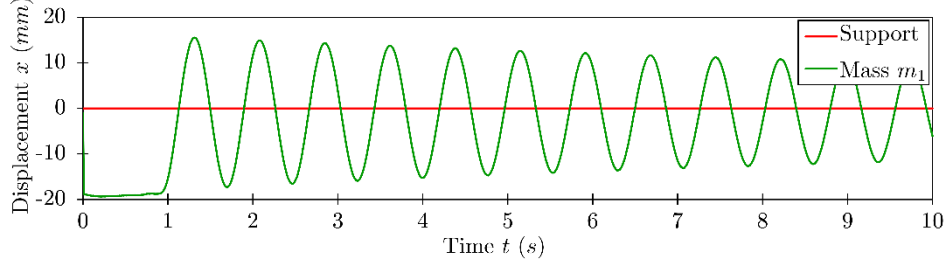


Figure 3. Experimentally obtained free oscillations of a SDOF beam

From this displacement-time graph (Figure 3) the damping ratio is calculated using the logarithmic decrement [2]

$$\zeta = \frac{\ln\left(\frac{A_i}{A_{i+1}}\right)}{\sqrt{4\pi^2 + \ln^2\left(\frac{A_i}{A_{i+1}}\right)}} = 0.006326, \quad (1)$$

where A_i is the displacement of the i^{th} peak (i^{th} amplitude). If the system behaves linearly during the motion, the logarithmic decrement will remain constant throughout entire motion, as well as the period of oscillation.

A series of such free oscillation tests with varying initial displacement amplitude has shown that the amplitudes with which the beam is excited should be very small if the system is expected to behave linearly, preferably around one centimeter in this case.

3.1.2. Optimal excitation amplitude determined from forced oscillation tests

One of the main challenges in this research has been choosing the appropriate amplitude of excitation which will not trigger non-linear effects. Even though the amplitudes of excitation need to be small enough so that only linear effects are triggered, they have to be large enough so that the experimental equipment can simulate the excitation function satisfactorily. The shake tables have linear encoders, which measure the actual displacements. It has also been noted that, for very small excitation amplitudes, this displacement-time history output does not ideally coincide with the one that is assigned as input. This has led to a series of harmonic support excitation tests aimed at detecting the minimum value of the excitation amplitude, which results in a satisfactory output (real) excitation.

The value of 0.6 mm roughly satisfies these requirements. Both the input and output (real) excitation function are presented below.

3.2. MDOF simply supported beam tests

The main experimental set-up consists of the previously described beam with weights of 8N placed into the quarters of the span simply-supported on the two shake tables (Figure 4). The calculated values for the first and the second natural frequency of the beam are $\omega_1 = 18.026 \text{ rad/s}$ and $\omega_2 = 72.957 \text{ rad/s}$ (Table 1). The experimental values of these frequencies have been obtained by observing the response ratio of the beam and detecting the frequencies which caused peak response ratio of the symmetric (1st) and asymmetric (2nd) mode. These values are $\omega_{exp,1} = 18.850 \text{ rad/s}$ ($f_{exp,1} = 3 \text{ Hz}$) and $\omega_{exp,2} = 72.257 \text{ rad/s}$ ($f_{exp,2} = 11.5 \text{ Hz}$). The chosen excitation amplitude is $u_0 = 1 \text{ mm}$ and the damping ratio (calculated from the SDOF experiments) is $\zeta = 0.006326$.

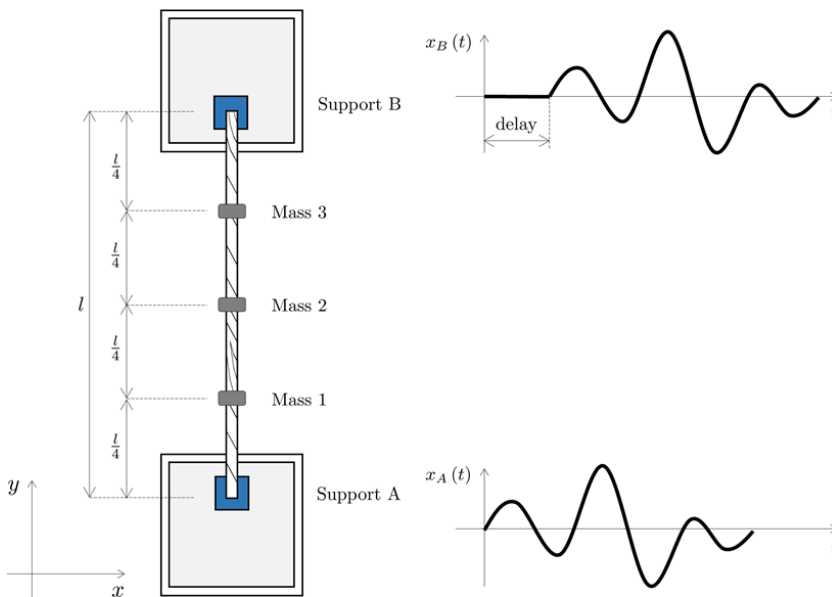


Figure 4. Top view of the experimental set-up with MDOF beam

3.2.1 Synchronous harmonic excitation

The harmonic excitation used to excite the beam is a sinusoidal displacement function

$$u_g(t) = u_0 \sin(\omega t), \quad (2)$$

where u_0 and ω are the amplitude and the angular frequency of the displacement function.

Firstly, both of the beam supports are simultaneously excited with a harmonic function with $u_0 = 0.001$ m and $\Omega_1 = \omega_{exp,1} = 18.850$ rad/s. It is expected that the symmetrical mode shapes (the 1st and the 3rd one) would be excited and, in this case, the experiment confirms the theoretical assumptions (Figure 5).

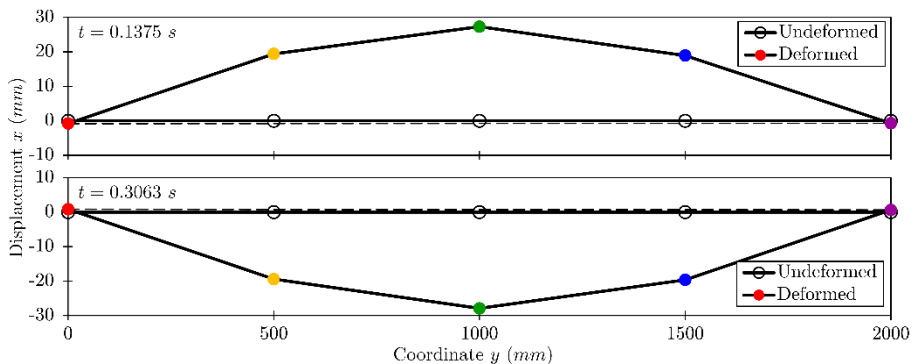


Figure 5. Deformation due to synchronous excitation with $u_0 = 1$ mm and $f = 3$ Hz ($\omega_{exp,1} = 18.850$ rad/s, close to 1st resonant frequency)

The dynamic response for such excitation is shown in Figure 6. Clearly, the measured excitation is not identical to the input excitation function. As described in Section 3.1.2, this cannot be controlled more precisely owing to the limitations of the shake tables.

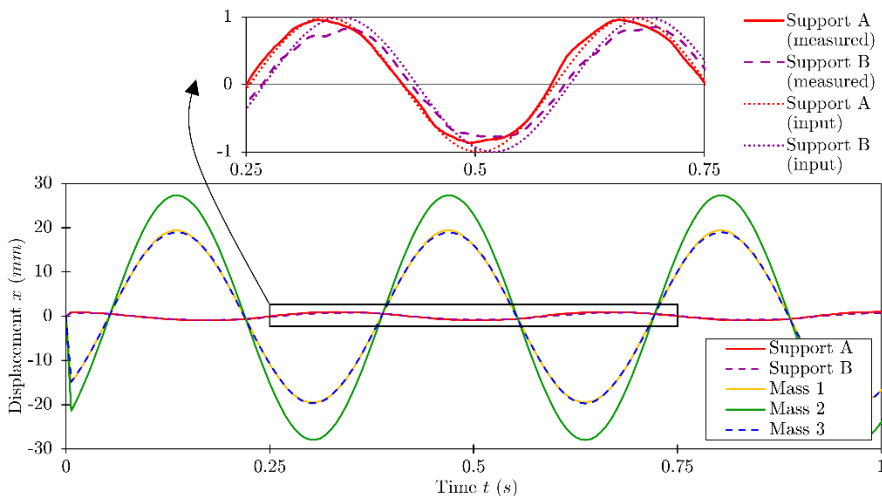


Figure 6. Excitation (top) and response (bottom) due to synchronous excitation with $u_0 = 1$ mm and $f = 3$ Hz

Experimentally, the response ratio reaches the value of $R_d = 28.382$, which is far below the analytically calculated value. It must be added that a small change in the excitation frequency at resonance causes a large change in the response ratio and any present imprecision (such as e.g. in the material properties or excitation frequency) is expected to have a large effect.

Secondly, the experiment is repeated for the case of a synchronous excitation with $u_0 = 0.0005 \text{ m}$ and $\Omega_2 = \omega_{exp,2} = 72.257 \text{ rad/s}$. Ideally, only the symmetrical mode shapes would be excited, even though the excitation frequency is chosen to be as close as possible to the second resonant frequency. The following graphs show that the beam acts slightly different from that and a contribution of the skew-symmetric (2nd) mode of oscillation can very much be noticed (Figure 7). This behavior may be a result of small differences between the excitation simulated with the two shake tables, providing a minor source of asynchronous excitation, which would probably have no effect and go unnoticed if the excitation frequency were not close to the 2nd natural frequency. Moreover, any deviation from symmetry in geometry or material properties is bound to have a pronounced effect for such an excitation frequency.

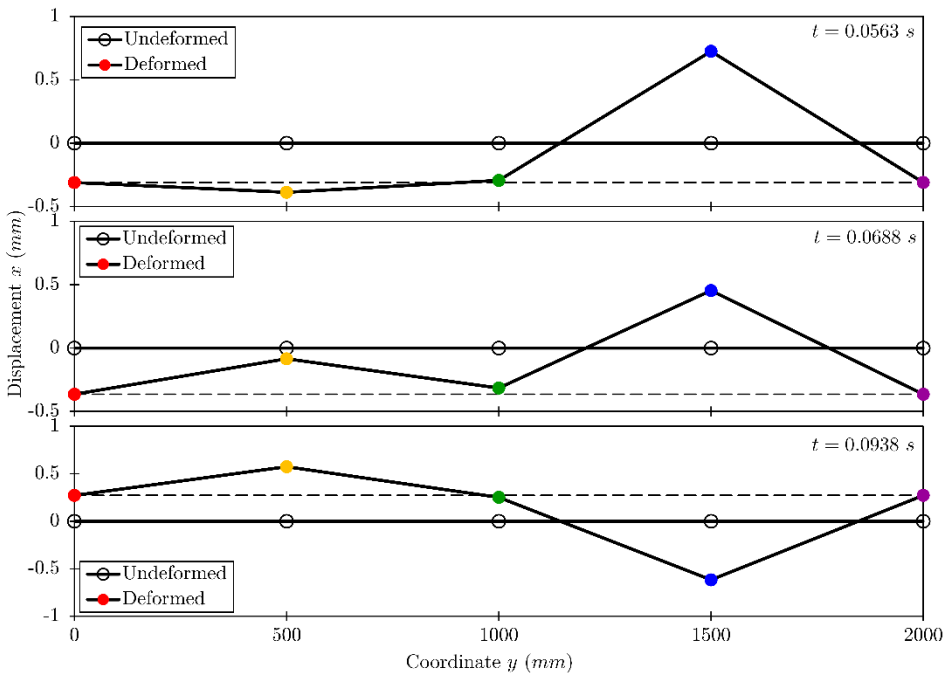


Figure 7. Deformation due to synchronous excitation with $u_0 = 0.5 \text{ mm}$ and $f = 11.5 \text{ Hz}$ ($\omega_{exp,2} = 72.257 \text{ rad/s}$, close to 2nd resonant frequency)

The corresponding dynamic response is shown in Figure 8.

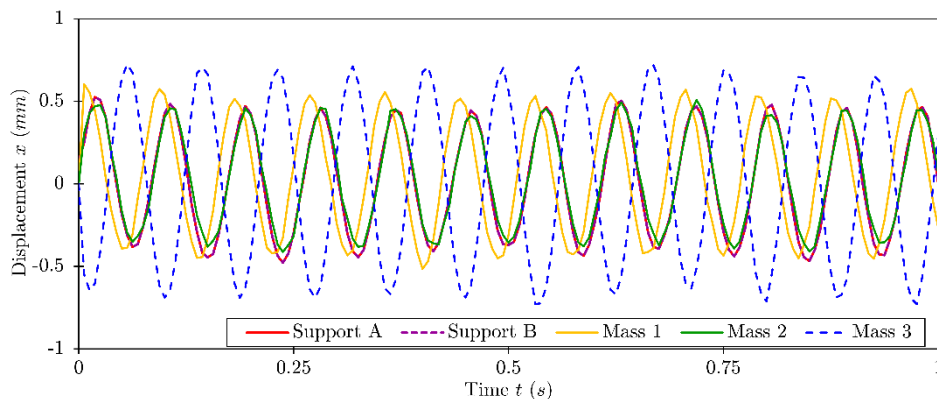


Figure 8. Excitation and response due to synchronous excitation with $u_0 = 0.5 \text{ mm}$ and $f = 11.5 \text{ Hz}$

3.2.2. Asynchronous harmonic excitation

When the beam is subject to an asynchronous excitation, the supports undergo the same motion function (2), but with the opposite sign. Under such skew-symmetric excitation, the beam is expected to follow the skew-symmetric (2nd) mode shape.

Firstly, the beam is excited with an asynchronous excitation with $u_0 = 0.0005 \text{ m}$ and $\Omega_1 = \omega_{exp,1} = 18.850 \text{ rad/s}$ ($f = 3 \text{ Hz}$). As it can be seen in Figure 9, the beam oscillates with a shape, which resembles the 2nd mode shape. However, we can notice a contribution of a symmetric mode shape from the position of the middle mass.

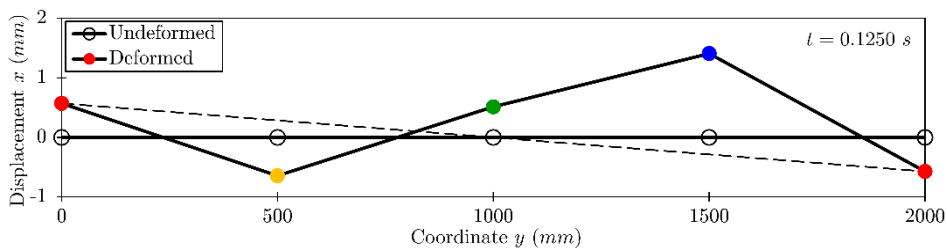


Figure 9. Deformation due to asynchronous excitation with $u_0 = 0.5 \text{ mm}$ and $f = 3 \text{ Hz}$ (close to 1st resonant frequency)

We attribute such behavior to the same reasons as those provided for the earlier case of the synchronous excitation at a frequency close to the 2nd resonant frequency. This is not expected to happen when the excitation

frequency is close to the 2nd natural frequency, which should trigger only skew-symmetric modes.

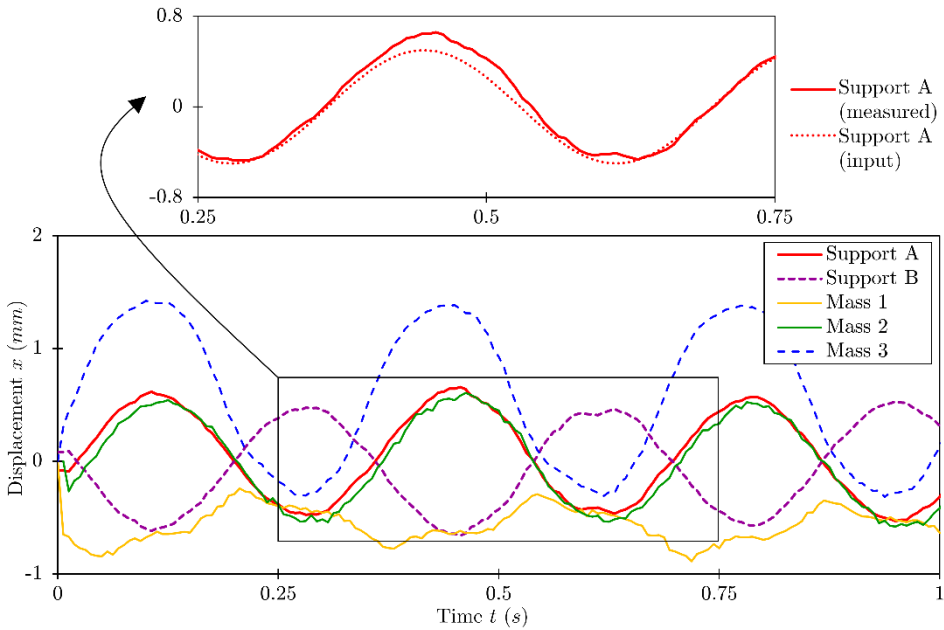


Figure 10. Excitation (top) and response (bottom) due to asynchronous excitation with $u_0 = 0.5 \text{ mm}$ and $f = 3 \text{ Hz}$

As expected, a better correlation between the expected mode shape and the recorded one is obtained for the asynchronous excitation with $u_0 = 0.012 \text{ m}$ and the second resonant frequency, $\Omega_2 = \omega_{exp,2} = 72.257 \text{ rad/s}$ (Figure 11), where the mode of oscillation is completely skew-symmetric. Note that the amplitude of the excitation function is here much larger than in the previous experiment, so that the modes of vibration may be better observed.

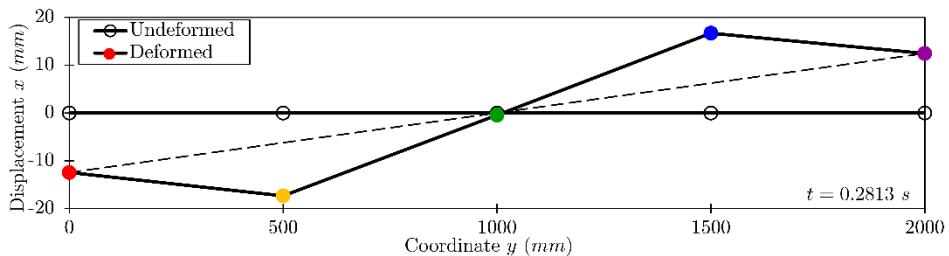


Figure 11. Deformation due to asynchronous excitation with $u_0 = 12 \text{ mm}$ and $f = 11.5 \text{ Hz}$ ($\omega_{exp,2} = 72.257 \text{ rad/s}$, close to 2nd resonant frequency)

This excitation results in a response, which almost ideally follows 2nd mode of oscillation, with the exception of a small oscillation of the middle degree of freedom (mass 2) around its initial position (Figure 12).

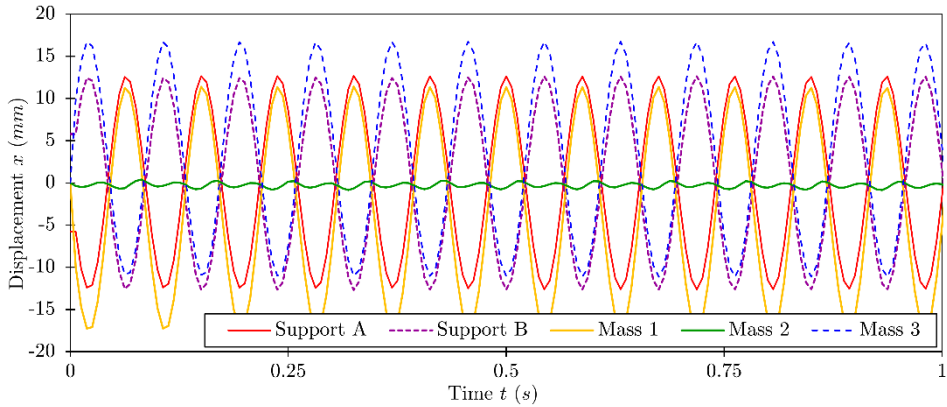


Figure 12. Excitation and response due to asynchronous excitation with $u_0 = 12$ mm and $f = 11.5$ Hz

3.2.3 Synchronous earthquake excitation

Finally, the behavior of the beam subject to both uniform and non-uniform earthquake excitation was explored and documented as a unique experimental benchmark case of a multiple-support-excitation behavior.

The Northridge 1994 earthquake acceleration record is scaled to be simulated with the available shake tables system. When the earthquake excitation is simulated uniformly with both shake tables, thus exciting both supports simultaneously, the response is largest when the excitation is the largest, after which the oscillations decrease relatively quickly (Figures 13 and 14).

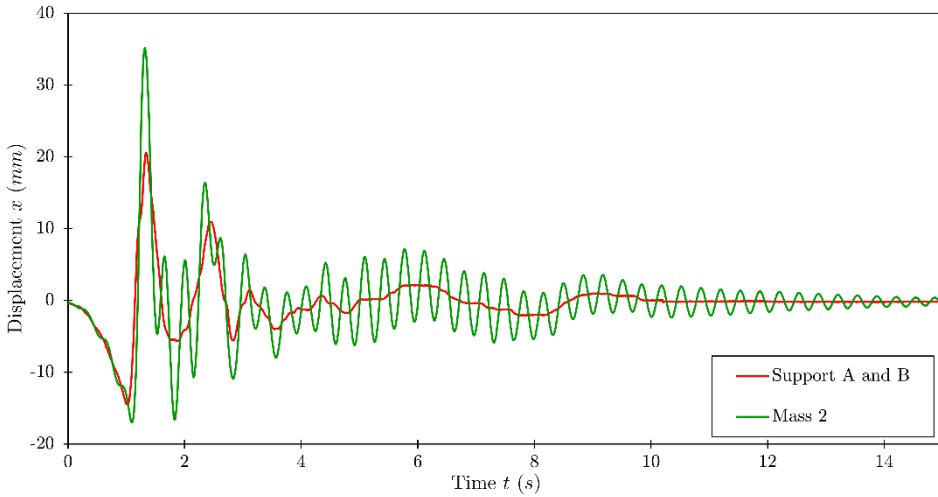


Figure 13. Earthquake excitation and response of the beam

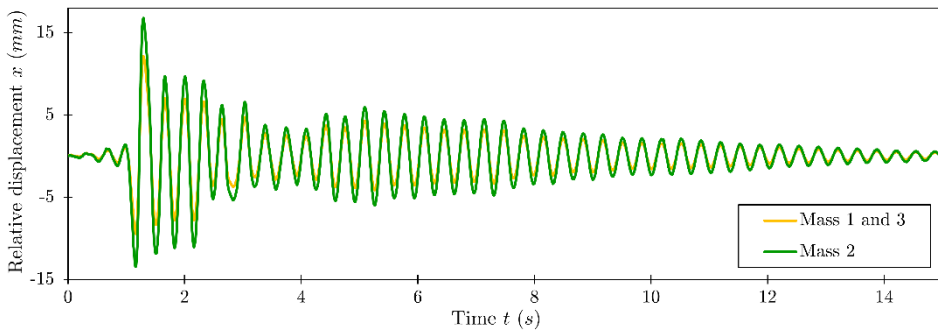


Figure 14. Relative displacements of the DOFs of the beam

3.2.4 Earthquake excitation with delay

Non-uniform earthquake excitation is achieved by again simulating Northridge 1994 earthquake with both tables, but now with a time delay between the beginning of the excitation at table A (support A) and at table B (support B) as $t_d = 1$ s. The displacements, which occur in this case, are not so large when the excitation is the strongest, but later in time they dissipate more slowly than in case of uniform excitation (Figures 15 and 16). This kind of behavior can represent an alternative dangerous scenario, which is usually not taken into account in the assessment of the dynamic response of structures.

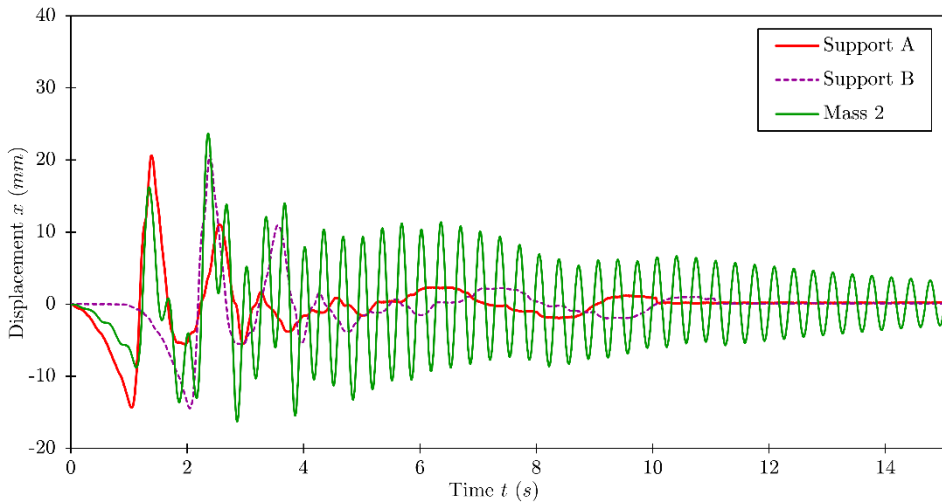


Figure 15. Excitation and response of the beam subject to earthquake excitation with delay

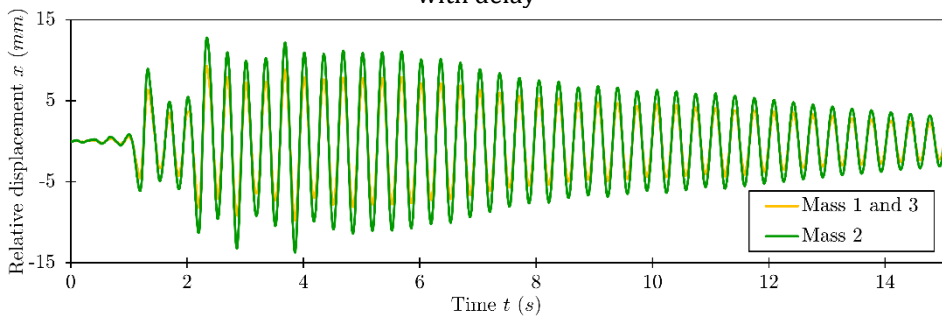


Figure 16. Relative displacements of the DOFs of the beam subject to earthquake excitation with delay

4. Conclusion

The presented experimental analysis confirms the expected dynamic response, which suggests that ideally synchronous excitation triggers synchronous response, while ideally asynchronous excitation triggers asynchronous response. At the same time, this study shows how even minor sources of excitation can trigger significant contribution of asynchronous shapes in the total response of beams if the excitation frequency is close to the natural frequencies of asymmetric modes.

Finally, the dynamic response of beam structure to earthquake excitation shows that the response can be significantly different if different supports are subjected to the same earthquake function but with a certain delay, which simulates real earthquake conditions for long structures.

The concluding remarks open the way for developing a novel approach for seismic design of larger structures greatly affected by the non-uniform

earthquake excitation. Furthermore, the presented model tests may be helpful in validation of analytical and numerical procedures aiming to assess the dynamic response of structures subjected to multiple support excitation.

Acknowledgements. *This work has been supported in part by Ministry of Science, Education and Sports of the Republic of Croatia under the project Research Infrastructure for Campus-based Laboratories at the University of Rijeka (RC.2.2.06-0001). The project has been co-funded from the European Fund for Regional Development (ERDF). The results presented in this paper are the results of work done within following projects: Configuration-dependent interpolation in non-linear finite-element analysis of structures (HRZZ-IP-11-2013-1631), supported by Croatian Science Foundation and Testing of slender spatial beam structures with emphasis on model validation (13.05.1.3.06), supported by University of Rijeka.*

Literature

- [1] Heuer, R. (2016). *Meccanica dei materiali e delle Strutture: On Multiple Support Random Excitation of Bridge Structures*. Vol. VI, no. 1, pp. 50-57; ISSN: 2035-679X
- [2] Chopra, A.K. (1995). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Englewood Cliffs (New Jersey)
- [3] Clough, R.W. & Penzien, J. (2003). *Dynamics of Structures*. Computers and Structures, Inc., Berkeley
- [4] Harichandran, R. & Wang, W. (1988). *Response of Simple Beam to Spatially Varying Earthquake Excitation*. Journal of Engineering Mechanics 114(9)
- [5] Nazmy, A.S. & Abdel-Ghaffar, A.M. (1992). *Effects of Ground Motion Spatial Variability on the Response of Cable-Stayed Bridges*. John Wiley & Sons Ltd. Vol. 21, Pg. 1-20. Hoboken (New Jersey)
- [6] Li, J. et al. (2015). *Shake Table Studies of Seismic Structural Systems of a Taizhou Changjiang Highway Bridge Model*. Journal of Bridge Engineering, ASCE
- [7] Yang, C.-Y. et al. (2011). *Shake table Test of Cable-Stayed Bridge Subjected to Non-Uniform Excitation*. Procedia Engineering 14:931-938
- [8] Cuculić, M. et al. (2016). *Potencijali istraživačkog rada na Građevinskom fakultetu u Rijeci*. Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet

TENDENCIJE U SUVREMENIM FASADAMA U RIJECI

TRENDS IN CONTEMPORARY FACADES IN RIJEKA

Iva Mrak*, Edin Redžović*

Sažetak

Kako je 19. stoljeće stoljeće razvoja konstrukcija, tako je 20. stoljeće je stoljeće razvoja novih materijala za konstrukcije, ali i završne radove pa tako razvoj i upotrebu konstrukcija uvedenih u 19. i 20. stoljeću slijedi i razvoj fasadnih sistema. U radu se analizira ovaj razvoj na primjerima u Rijeci i riječkoj okolici.

Ključne riječi: fasade, Rijeka, moderna arhitektura, suvremena arhitektura

Abstract

Since the 19th century is the century of the development of structures, the 20th century is the century of the development of new construction and finishing works materials. Thus, the development and use of the structures introduced in the 19th and 20th centuries is also followed by the development of the façade systems. The paper analyzes the development of the case studies in Rijeka and its surrounding area.

Key words: façades, Rijeka, modern architecture, contemporary architecture

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: iva.mrak@gradri.uniri.hr; edin.redzovic@student.uniri.hr

1. Uvod

Dok suvremene konstrukcije počinju svoj razvoj velikim dijelom u 19. stoljeću (posebno se radi o armiranom betonu i čeliku) [1, 2], u 20. stoljeću njihova se upotreba rasprostranjuje, ali i prati razvojem materijala i tehnologija završnih radova, kao što su fasade. Posebno je karakterističan primjer ovješanih fasadnih sistema (curtain-wall) koje su danas nezamjenjiv dio suvremenog okoliša [3]. Dok su tradicionalne fasade prvenstveno štatile zgradu od kiše (npr. tradicionalne žbuke) te osiguravale zgradama estetski dojam (fresco, kamene fasade...), danas su zahtjevi koje se traže od fasadnih sistema sve raznovrsniji, a uključuju toplinski i zvučnu izolaciju, vatrootpornost, zaštitu od buke, higijenu [4], jednostavnost i brzinu izvedbe, dugotrajnost pa čak i reakciju na okoliš (npr. proizvodnjom električne energije ili mijenjanjem svojstava), a različiti slojevi pridonose različitim funkcijama (sprečavanje prolaza vodene pare, ulaska kiše, stvaranja kondenzacije, toplinska izolacija...) [5].

Rijeka i riječka okolica su danas priznati kao područje gdje su moderni i suvremeni stilovi dosegli značajan razvoj (secesija, moderna, poslijeratna arhitektura...) u primjerima konstrukcija, što je dokumentirano i u brojnoj literaturi, npr. [6, 7, 8, 9, 10]. Cilj rada je shvatiti razvoj i upotrebu tehnologija suvremenih fasada na primjerima u gradu Rijeci i okolici te posebno odgovoriti na istraživačka pitanja (navedena u dijelu rada „Metodologije i materijali“) kako bi se dao uvid u razvoj fasada, posebno u suvremenom periodu (rad se prvenstveno bavi razvojem fasada od Drugog svjetskog rata do danas, dok je radi razumijevanja razvoja fasada u vremenskom slijedu dan pregled i međuratne arhitekture kada se pojavljuju tendencije koje se kasnije razvijaju) te time pridonijeti stvaranju kulturne (kako definirano u [11] i tehničke (sfere ljudskog djelovanja koji su nerazdvojno povezane, npr. [12]) podloge za razumijevanje procesa razvoja fasada, utjecaja tehnologije i inovativnosti na kvalitetu fasade zgrade, čime bi se stvorila baza za dokumentiranje, prezentaciju, obnovu, ali i kreiranje novih fasada koje bi odražavale visoku razinu istraženih primjera na lokalnoj razini.

2. Metodologije i materijali

Već pri samom postavljanju teme nailazi se na različite termine kao što su „fasada“, „fasadni sistem“ i „ovojnica“. Fasada je definirana u [13] kao „1. arhit. a. prednja strana zgrade; pročelje b. gornji vanjski sloj na vanjskim zidovima kuće ...“. Termin „fasada“ se izjednačava sa terminom „pročelje“ te se poistovjećuje s jednim slojem koji nije direktno povezan s jednim određenim načinom izvođenja završnih radova, no implicira jedan sloj na sistemu nosivih zidova. Sličnu definiciju nalazimo u [14] gdje je „fasada“

poistovjećena s „pročeljem“ koje je definirano kao: „lice zgrade [...], a kod slobodno stojećeg ili razvedenog objekta sve vertikalne plohe su pročelja, pa čak i krovšte.“ Ova definicija daje slobodan izbor materijala i tehnologija za obradu pročelja, no pri definiciji „fasaderskih radova“ („oblaganje fasadnih površina prirodnim i umjetnim kamenom...“) implicira određene vrste radova i obloga fasade koji ne bi automatski uključivali ostakljene fasade, ventilirane aluminijske fasade i druge suvremene obrade fasada. Oba izvora definiraju termin „fasada“ kao a) istovjetni s terminom pročelje, odnosno jednom stranom (ili više strana) zgrade, b) impliciraju određene radove koje je lakše povezati s tradicionalnim radovima obrade sistema nosivih zidova, iako ih ne definiraju eksplicitno na taj način. Sistem je u [13] definiran kao: „1. ukupnost načela ili stvari usklađenih da čine cjelinu; sustav“, a izjednačava značenje i sa riječi „sustav“. Iako se ne navodi primjer iz arhitektonske discipline, može se zaključiti da fasadni sistem ili sustav može označavati „ukupnost stvari“ usklađenih radi rješenja fasade, odnosno pročelja.

Ovojnica [13] definira kako slijedi: „mekana, plosnata i tanka površina koja priliježe izvana uz što ...“, „tanka opna koja ovija neki plod ili tjelesni organ“, odnosno veže ovaj pojam isključivo uz biološke fenomene. Može se pretpostaviti da se u prenesenom smislu zadržava smisao prislonjenog sloja kao što su toplinske izolacije na pročeljima zgrade, čime bi se opet implicirao sistem nosivih zidova na koji je nanesen neki mekši sloj, npr. toplinska izolacija. Najkonkretniju definiciju termina ovojnica daje [15] koji definira ovojnica kao: „Ovojnica zgrade jesu ugrađeni dijelovi zgrade koji odvajaju unutrašnjost zgrade od vanjskog okoliša.“ Prema ovoj definiciji, ovojnica čine svi dijelovi zgrade koji odvajaju unutrašnjost zgrade od okoliša, a ova definicija također pokriva i različite vrste nosivih konstrukcija i završnih obloga pa može uključivati nosivi zid sa dodatnim slojevima, kao i skeletnu konstrukciju sa staklenim nenosivim elementima te druga moguća tehnološka rješenja. Vidimo da u tumačenjima ovih pojmova postoje određena preklapanja gdje je fasada=pročelje=ovojnica (u onom dijelu koji nije pod ili krov)=fasadni sistem kao ukupnost stvari koja stoji između unutrašnjeg i vanjskog prostora i čini fasadu ili pročelje, zbog čega imamo kružnu referencu.

Radi ovih djelomičnih preklapanja i djelomičnih razlika u terminima koji se svi odnose na vanjske elemente zgrada, u radu se koristi termin fasada u značenju „završni ne nosivi dio pročelja“, gdje se pročelje smatra vanjskim dijelom zgrade koji vidimo, definirano plohom, a koji nije krov ili pod, neovisno o vrsti nosive konstrukcije (u radu su obrađeni primjeri zgrada s različitim nosivim konstrukcijama). „Fasadni sistem“ se koristi kao ukupnost stvari koje čine fasadu ili pročelje, a nisu nosiva konstrukcija zgrade. Ovojnica se koristi u definiciji koja je dana zakonskom regulativom.

Analiza razvoja fasada i tehnologija Rijeke i riječkog područja je provedena u nekoliko faza. U prvoj fazi dan je okvir razvoja prema osnovnim periodima moderne i suvremene arhitekture prema poznatim svjetskim primjerima. Pregled svjetskih primjera izvršen je uvidom u literaturu i internetske izvore. U drugoj fazi je analizirana situacija u riječkom području kroz analitičke opise svakog primjera (37 primjera: 29 primjera iz Rijeke i 8 iz okolice). Napravljeno je 110 fotografija te su korišteni pisani i internetski izvori. Napravljeno je 6 vrsta analitičkih i komparativnih tablica, od kojih su u radu prikazane 3.

Kriteriji odabira primjera bili su: raznovrsnost materijala i tehnologija (pronađeno je 12 različitih materijala i 54 varijantnih tehnologija), pokrivenost različitih vremenskih razdoblja i stilova s težištem na suvremenoj arhitekturi (od međuratne arhitekture do 21. stoljeća: moderna 6, visoka moderna 11, suvremena arhitektura 18), namjene (stambena 8, poslovna 5, javna 16, mješovita 7), važnost primjera od nacionalne do lokalne važnosti (pokrivenost literaturom, pozicija u naselju, priznatost projektanta...), pozicije u centru (Jadroagent, Kraš, Robna kuća RI, Hotel Bonavia, PBZ, Zagrad, Tower...), djela poznatih arhitekata (Ostrogović, Emili, Kučan, Magaš, Randić, Turato, 3LHD...), ali i djela manje poznatih i novijih ureda ako su se koristili inovativni materijali i tehnologije (MF Arhitekti, MR2...).

U završnoj fazi se kronološkom usporedbom te usporedbom prema materijalima i tehnologijama pokušava utvrditi razvoj i povezanost trendova u svijetu i u riječkom području, promjene u korištenju materijala i tehnologija tijekom vremena te odgovoriti na istraživačka pitanja (koja su danas ključni dio pristupa istraživanja u arhitekturi i urbanizmu [16]): 1. Koji materijali i na koji način se upotrebljavaju u kojem periodu i kontekstu u Rijeci? 2. Mijenja li se važnost fasada tijekom vremena (i način obrade), odnosno uočava li se važnost nekih drugih faktora u oblikovanju i prepoznatljivosti objekta? 3. Prati li u Rijeci razvoj materijala i tehnologija svoj razvoj i primjenu u svijetu, odnosno mogu li se uočiti trendovi u tom smislu i preferiraju li se neki materijali umjesto drugih koji se u tom periodu koriste u svjetskom kontekstu? U ovu svrhu izrađene su analitičko-komparativne tablice: 1) Usporedba perioda, namjene, lokacije i materijala, 2) Analitički pregled fasada u svjetskoj arhitekturi od međuratnog razdoblja do danas, 3) Analitičke tablice fasada na lokalnim primjerima – međuratna arhitektura, 2. polovica 20. stoljeća, 21. stoljeće, 4) Analitičke tablice osnovnih značajki zgrada, za navedena razdoblja 5) Sintetičke tablice upotrebe materijala i tehnologija u svjetskoj i lokalnoj arhitekturi, na temelju analiziranih primjera, za navedena razdoblja 6) Komparativne tablice usporedbe trendova u korištenju materijala i tehnologija za fasade, prema svjetskim i lokalnim primjerima, za navedena razdoblja. Na temelju

ovih analiza i usporedbi napravljena je diskusija rezultata i na kraju dani zaključci.

3. Fasade u modernoj i suvremenoj arhitekturi

Tijekom povijesti, zgrade su karakterizirale različite vrste fasada [1, 17, 18, 19]: različite (često vrlo kvalitetne vrste [20]) žbuke [21], kamen [22], opeka, drvo, keramika... U 19. stoljeću razvoj novih konstrukcija (armiranobetonske, željezne i čelične) omogućuje razvoj fasada nove koncepcije – nenosivih ovojnica (npr. staklene površine, tanke panelske fasade aluminijske legure ili plastične mase), a razvoj materijala i disciplina energetske učinkovitosti dovodi do razvoja toplinskih izolacija te drugačijeg pristupa izvođenja fasada i na sistemima nosivih zidova. Iako se staklene fasade pojavljuju još krajem 19. st. (LeBaron Jenney, Leiter Building Chicago, 1879.) [3], fasade svjetske arhitekture tijekom 20-ih i 30-ih godina još većinom karakteriziraju žbukane fasade (npr. zgrade u Weissenhof-Siedlung, Stuttgart, 1927.), ili kamene obloge (Paviljon Barcelona, van der Rohe, Barcelona, 1929., Palazzo della Civiltà Italiana, Guerrini i dr., Rim, 1937., Bear Runs, Fallingwater, Wright, u Pennsylvaniji, 1939.).

Poslijeratna estetika se izražava npr. kroz upotrebu tehnologije béton brut (Le Corbusier, Unité d'habitation, Marseilles, 1952.). Uz novu upotrebu materijala, fasadu karakteriziraju i duboka profilacija mase pročelja (raster loggia dvostruke visine te armiranobetonski brise-soleili) i jarki kromatizam. U arhitekturi se zadržava (ili ponovo uvodi) obrada ploha keramikom ili bojanim staklom te upotreba kamena. Razvijaju se ovješene fasade, odnosno ostakljene fasade koje su ovještene na nosivu konstrukciju: „curtain-wall“ (Belluschi, Equitable Savings and Loan Association, Portland, 1945.-48., van der Rohe, Zgrada Seagram New York, 1958.). Određena eksperimentiranja uključuju i panele od plastičnih masa, nekad ujedno konstrukcija i ovojnica (A. i P. Smithson, House of the Future, 1956.). Razvoj visokih zgrada, nosivih konstrukcija i stakla rezultira pravcem arhitekture visoke tehnologije (HI-Tech - npr. Norman Foster, Zgrada HSBC Hong Kong, 1985.) gdje se na fasadi pojavljuju zahtjevne čelične konstrukcije i staklo. Tijekom postmodernizma, ponovo se javljaju tradicionalni materijali kao što su žbuka (R. Venturi, kuća Vanna Venturi, Chestnut Hill, 1964.) ili kamen (M. Graves, Zgrada Portland, Portland, 1982.).

Suvremenom arhitekturom često se iskazuju tehnološke mogućnosti pa se tako pojavljuju zaobljena stakla, staklene fasade s minimalnim dijelom čeličnih elemenata i slično (Hadid, Stambena zgrada, New York, u izgradnji, Foster + Partners, Apple Park, Cupertino, 2017.). Ne zaboravljaju se ni sada već tradicionalni materijali (kamen, beton, ali i metalne legure ili PVC) već se istražuju mogućnosti njihove upotrebe na nove načine (npr. beton -

Hadid, Maxxi, Rim, 2010. poliesterske obloge - Hadid, Kulturni centar Heydar Aliyev, Baku, Azerbajdžan, 2012., kamen - RPBW, Valletta City Gate, Malta, 2015.).

4. Fasade u arhitekturi Rijeke i riječkog područja

Od sredine 19. stoljeća, Rijeka doživljava gospodarski, urbani i arhitektonski procvat, posebno do 1. svjetskog rata. U međuratnom razdoblju širi se moderni stil tijekom kojeg nastaju brojne zgrade, a u materijalima je vidljiv utjecaj talijanske škole (kamen, keramička obloga...). Sušački neboder, u tada podijeljenom gradu, radi Josip Pičman (u periodu 1934.-1939.) koji predlaže izvedbu staklenog tornja, a zatim rad nastavlja Alfred Albini (do 1947.). U drugom dijelu grada gradi se poslovna zgrada, R.O.M.S.A. (INA), 1938. arhitekta Enee Peruginija, koja je izuzetan primjer arhitekture racionalizma na ovim prostorima. Brojna je višestambena gradnja, a tipično rješenje je npr. zgrada u Osječkoj ulici, arhitekta Giulija Duimicha, gdje se balkoni linijski ističu svojim zatvorenim punim ogradama, a prozori su, gdje je to bilo moguće, riješeni kao trakasti. Mali neboder, Raoula Puhalića, prepoznatljiv je po zaobljenim linijama kojim zatvara kut bloka i linijskim balkonima. Zgrada Riječkog nebodera – Palača Arbori, arhitekta Umberta Nordia, 1939., tada stambeno poslovne namjene, karakteristična je po svojim jednostavnim linijama pročelja, izraženom konstrukcijskom rasteru i ostakljenjima, ali i oblozi od keramičkih pločica.


Nakon 2. svjetskog rata Rijeka doživljava ekspanziju gradnje, što zbog doseljavanja stanovnika u industrijski centar, što zbog obnove ratom razrušenih dijelova grada. Kako su i dijelovi samog povijesnog centra bili srušeni, tako se neke od zgrada, posebno javne i poslovne namjene, koje se tada grade, nalaze u samom centru grada. Osim obnove centra, prioritet je bila stambena izgradnja koja je u prvom trenu monokromna (naselja Labinska, Deksa, Zamet, Vulkan), a u drugoj fazi postaje kromatski obrađena (Voplin, Baredice, Ogranak, Turnić, Autoput) [23, 24]. Riječka banka (danas Erste banka) Kazimira Ostrogovića (1965.) preuzima osnovne linije susjednih zgrada, definira kut bloka i komunicira sa svojim okolišem. Bogatu prostornu i volumensku definiciju ujednačuju obloga u kamenu i velika ostakljenja. Jaku stambenu izgradnju do 1980-ih u Rijeci karakteriziraju stambeni tornjevi. Među najuspješnijim primjerima je neboder na Podmurvicama Igora Emilija (1970.) gdje se pojavljuju prefabricirani armiranobetonski elementi koji formiraju filter između vanjskih i unutrašnjih prostora i daju dubinu obradi fasada. Emili 1970-ih u centru grada radi poslovne zgrade Jadroagenta, Kraša, PBZ banke te Robnu kuću Varteks [25], koje interpolira u postojeću izgradnju. U ovim zgradama karakteristično je uklapanje u kontekst razlamanjem volumena ili

preuzimanjem oblika tradicionalne gradnje, kula ili svodova. Fasade su pak ostakljene u toniranom staklu, obložene kamenim pločama te sa skulpturalnim elementima kao što su mesingane obloge ili izbočeni izlozi. Nešto je drugačija Zgrada Kraša koja definira kut jednog od najvažnijih blokova u centru grada; ima naglašeni konstrukcijski raster, a polja su zatvorena staklom i elementima zasjenjivanja. Turistički kompleks Haludovo, Malinska (1971.), Borisa Magaša u okolici Rijeke se i danas smatra jednim od najznačajnijih primjera turističke arhitekture u Hrvatskoj. Zgradu hotela definiraju prefabricirani paneli „U“ presjeka, velike staklene površine i tanki dematerijalizirani stupovi. Pročelje Robne kuće Ri Ninoslava Kučana (1974.) karakteristično je po industrijskom izgledu megakonstrukcija koji je postignut fasadom iz armiranobetonskih panela i oblogom iz prostorne rešetke. Telegrafsko-telefonski centar (Kučan, 1976) karakterističan je po pročeljima koja su izvedena od bijelih geometrijski obrađenih panela. Naselje Krnjevo (Kučan, 1980.) karakteristično je po organizaciji s vanjskim galerijama i oblogama u crvenom i plavom profiliranom limu [26]. Crkva Sv. Nikole na Turniću (Boris Magaš, 1988.) karakteristična je po svom oblikovanju, gdje su fasada i krov spojeni u isti volumen upotrebom iste kamene obloge.

Od 1990-ih mijenja se ustroj jedinica lokalne samouprave pa je tako područje Općine Rijeka podijeljeno na Grad Rijeku i niz manjih gradova i općina. Područje Grada Rijeke je tada već većinom izgrađeno pa se idućih godina rade obnove već postojećih zgrada, kompleks Kampusu na Trsatu (na području bivše vojne zone), a većina novogradnje se odvija u okolici Rijeke. Jedan od važnijih zahvata je obnova (2000. g., Studio Remik) Hotela Bonavia iz 1886. g. Na fasadi se izmjenjuju svijetli i tamni kamen te strukturalna fasada s tamnim staklom. Isti ured radi kompleks Tower centra koji sadrži trgovački centar, garažni prostor i poslovno-stambeni toranj (2005.-2008.). Pročelja su karakteristična po prefabriciranim armiranobetonskim panelima sa završnim slojem u kuliru te reflektirajućoj staklenoj fasadi. Poslovno-stambeni kompleks Centar Zagrad (ured Randić-Turato, 2007.) jedan je od najvećih zahvata u Gradu Rijeci. Na zgradi se pojavljuje više vrsta fasada: kontaktna, ostakljena polustrukturalna, strukturalna, aluminijska, keramički mozaik... Isti ured 2009. godine radi stambeno-poslovnu zgradu u Agatićevoj ulici u centru grada. Fasada i krov imaju jednaku završnu oblogu te se spajaju u istu razlomljenu plohu. Obloga je aluminijska i ostakljena reflektirajućim staklom. Sportski Centar Zamet (ured 3LHD studio, 2009. g.) sadrži dvoranu, poslovne, rekreacijske, prodajne i uslužne prostore, garažu i vanjski trg, a karakteriziraju ga oblikovanje i keramičke obloge. Sveučilišni Kampus na Trsatu je zona s više fakulteta i pomoćnih sadržaja Sveučilišta, a zgrade su otvorene između 2012. i 2016. godine. Islamski centar Rijeka (idejno rješenje kipar Dušan

Džamonja, projekt ADB d.o.o Zagreb, 2013.) sadrži izuzetno zahtjevne ljuskaste konstrukcije u armiranom betonu te ga krasi različite vrste fasada. Zgradu JGL (Rožić arhitekti i Katusić Kocbek arhitekti, 2015.) karakterizira zaobljeni volumen obložen profiliranim limom. Poslovno-stambene zgrade uz Kampus (ureda MR2) na pročeljima alterniraju kontaktnu i ventiliranu ostakljenu fasadu (novost u riječkom području), a dodani su i volumeni radi raspršivanja djelovanja vjetra. Višestambena zgrada (Studio Area arhitektura) ima klasičnu kontaktnu fasadu. DV Katarina Frankopan, Baška (MF Arhitekti, 2011.) karakteriziraju prefabricirani armiranobetonski paneli s kamenom. Ured Idisa Turata 2014. na sličan način definira pročelje dvorane u Krku, gdje je na armiranobetonskim panelima prenesen motiv gromača. Izvadak iz analitičke tablice prema analiziranim razdobljima je dan u Tablici 1, a zbog prostornog ograničenja prikazani su samo radovi iz najnovijeg razdoblja koje odlikuje iznimna raznolikost materijala i tehnologija ili inovativni proizvodi.

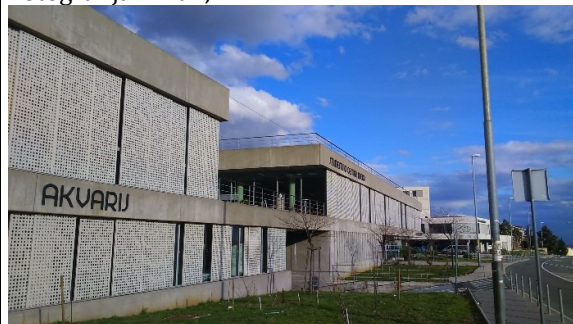
Tablica 1. Analitička tablica prema analiziranim razdobljima - izvadak

Primjer	Glavni materijal/dodatni materijali Opis
Randić-Turato, Centar Zagrad, 2007.	<p>Kontaktna fasada (žbuka)/mozaik/staklo /vlaknocementni profilirani paneli</p> <p>Na zgradi se pojavljuje više vrsta fasada: kontaktna fasada, mozaik, ostakljena aluminijska fasada, ostakljenja s brise soleilima, obloge od vlaknocementnih profiliranih panela... Zadnje dvije etaže izvedene su sistemom demit fasade. Ventilirane mozaik fasade izvedene su na nosivim pločama od recikliranog stakla i karakteristične su po istacima otvora uokvirenima u aluminijskom limu. Za ovaj dio fasade vršila su se i ispitivanja materijala u laboratoriju. Profilirani vlaknocementni paneli karakteriziraju pročelja garaže. Ostakljena fasada ima nejednako raspoređene aluminijske profile te je izvedena staklom različitih boja. Oblaganje vidljivom toplinskom izolacijom s unutarnje strane stakla. Brise-soleil se pojavljuju kao vertikalni i horizontalni, aluminijski i stakleni.</p> <p>Fotografija: Redžović, E.</p> 

<p>3LHD, Sportski centar Zamet, 2009.</p>	<p>Keramičke ploče/staklo Kompleks je karakterističan po oblikovanju volumena kao terena, što je naglašeno jednakom keramičkom oblogom kompleksa (vertikalne, horizontalne i nagnute plohe) i terena trga. Uz keramičku oblogu, u kompleksu se javlja fasada u U-staklu i ostakljena strukturalna fasada. Fotografija: Redžović, E.</p> 
<p>Dječji vrtić Katarina Frankopan, Baška, Otok Krk, Marko Franković, 2011.</p>	<p>Kamen-armirani beton/kontaktna fasada/staklo Fasada je karakteristična po prefabriciranim armiranobetonskim panelima sa završnom oblogom u kamenu. Dijelovi panela koji nisu u kamenu obrađeni su u kontaktnoj fasadi. Ograda terasa je u lameliranom staklu, a zasjenjenje je riješeno staklenom nadstrešnicom na koju su postavljene kamene škrilje. Fotografija: MF Arhitekti</p> 
<p>MR2, poslovno stambene zgrade Trsat, 2015.</p>	<p>Kontaktna fasada/ostakljena ventilirana fasada Kontaktna fasada je alternirana s ostakljenom ventiliranom fasadom visoke energetske učinkovitosti. Na dijelovima pročelja (sjever) pojavljuju se čelični elementi koji umanjuju udare bure. Krov je ozelenjen i postavljeni su kolektori i toplinske pumpe. Fotografija: Mrak, I.</p> 

Studentski centar, Kampus Trsat, Rijeka, Mirela Bošnjak, Mirko Buvinić, Maja Furlan Zimmermann, Ivan Galić, 2012.

Armirani beton/staklo/perforirani paneli Zgradu karakteriziraju velika ostakljena pročelja s pomičnim perforiranim panelima horizontalno uokvirena armiranobetonskim panelima.
Fotografija: Mrak, I.



5. Rasprava

Detaljnim uvidom na terenu i u dokumentaciju te analitičko-komparativnom analizom nastoji se odgovoriti na istraživačko pitanje br.1. U međuratnom razdoblju su prvenstveno zastupljeni žbuka i kamen, a sistem je kontaktna fasada (završni sloj se nanosi direktno na nosivi zid). Značajni dio ploha je ostakljen te je staklo najčešći materijal koji dolazi u kombinaciji s drugim osnovnim materijalom. U svim analiziranim primjerima (8) jedan materijal je prevladavajući, a sekundarni je staklo, sistem je kontaktni. Kao treći materijal, u 2 primjera pojavljuje se kamen. U drugom dijelu 20. stoljeća pojavljuju se staklo, žbuka, kamen, armirani beton, a rijetko drugi materijali kao aluminij, čelični lim, čelična rešetka, mesing... Staklo se prvenstveno pojavljuje kao ostakljenje otvora, a rjeđe kao ovješena fasada (Jadroagent, PBZ, Riječka banka...).

Pojavljuju se primjeri trodimenzionalno oblikovanih površina (Robna kuća Ri, PBZ, Telegrafski centar), ali predstavljaju rijetkost. Rijetko se pojavljuju elementi zasjenjena kao jedan od glavnih motiva na fasadama (Kraš...). Sistemi izvođenja fasada su većinom kontaktni, a dijelom se javljaju i ovješene staklene fasade (npr. kontinuirana fasada - Jadroagent). U većini analiziranih primjera (6/11) prevladavaju 2 materijala (npr. žbuka i armirani beton, staklo i armirani beton, staklo i kamen, aluminij i armirani beton), 2 primjera karakteristična su po 3 materijala, a u 1 primjeru dominira 1 materijal (aluminij).

Velika razlika vidi se u broju različitih korištenih sekundarnih materijala: 5 materijala se pojavljuje u 1 primjeru (PBZ), 4 materijala u 2 primjera, dok se u ostalim primjerima pojavljuje manji broj materijala. Najčešći sistem je kontaktni, a pojavljuju se i ovješene fasade (kontinuirane ostakljene fasade). U primjerima iz 21. stoljeća pojavljuju se staklo,

kontaktna fasada na toplinskoj izolaciji (današnja obrada koja daje dojam žbuke), kamen, armirani beton, a rjeđe keramika, lim, HPL, vlaknocementni paneli, istezi i drugi materijali. Staklo se i dalje više pojavljuje kao ostakljenje otvora (15 puta), ali je sve češća i ovješena fasada (9 puta). Trodimenzionalna obrada površina se pojavljuje 4 puta (prvenstveno se radi o različitim tehnologijama armiranog betona ili vlaknocementnih panela), ali je i dalje rijetkost. Elementi zasjenjivanja se pojavljuju 4 puta, odnosno i dalje su rijetkost. Zastupljeni sistemi se najčešće pojavljuju u kombinacijama (kontaktna, ventilirana i ovješena; ovješena i ovješena iz različitih materijala; ventilirana i ovješena...), a rjeđe se koristi 1 sistem (ventilirana fasada ili kontakt). U većini primjera pojavljuju se 2-3 materijala (15 primjera, obično staklo i drugi materijal), u 6 primjera podjednako su zastupljena 3 materijala, u 2 primjera pojavljuju se 4 materijala, u 1 primjeru čak 8 materijala i 10 različitih tehnologija (Zagrad), a u 1 primjeru 4 materijala (no pojavljuje se 5 varijantnih tehnologija - IC Rijeka). Primjećuje se velika zastupljenost tipskih tehnoloških rješenja kao što su aluminijski bond paneli, demit fasade, kontinuirane, strukturalne i polustrukturalne fasade, rjeđe adaptacija prefabriciranih elemenata postojećem projektu (kulir paneli - Tower centar, kontinuirana fasada s vidljivom kamenom vunom - Zagrad, armiranobetonski paneli - kompleks Studentskog standarda i SC) ili inovativni sistemi (paneli u armiranom betonu Sportske dvorane na Krku, DV K. Frankopan, ventilirana ostakljena fasada - zgrade na Trsatu, keramička obloga - Zagrad...).

Vremenom se povećava broj upotrebljivanih materijala, posebno se povećava broj korištenih materijala unutar jedne fasade, a učestalije su i kombinacije različitih sistema. Dok u međuratnom razdoblju zapažamo 5 materijala i tehnologija, u 2. polovici 20. stoljeća zapažamo 9 materijala i 15 tehnologija, a u 21. stoljeću 12 materijala i 34 varijante tehnologija (npr. strukturalna i kontinuirana fasada kao 2 varijante ovještene ostakljene fasade).

Usporedbom osnovnih značajki koje karakteriziraju analizirane zgrade (tablica nije prikazana zbog prostornog ograničenja) pokušava se utvrditi odgovor na istraživačko pitanje br. 2. Primjećuje se da je u međuratnom razdoblju definicija volumena u 4 primjera osnovna prepoznatljiva karakteristika, a fasada u 2 primjera. U 2. polovici 20. stoljeća fasada je u 10 primjera osnovna značajka, a u 1 primjer je to volumen (crkva Sv. Nikole...), a u 1 primjeru nalazimo kao značajku i konstrukciju (svod - Jadroagent). U 21. stoljeću fasada je u 16 primjera osnovna značajka, a volumen u 3 (Agatićeva, Sporstki centar Zamet, kuća u Njivicama...), pa možemo zaključiti da je fasada sve češće osnovna značajka zgrade, što je u skladu s tradicijom 2. polovice 20. stoljeća. Velika razlika se tijekom vremena uočava u tehnologijama fasada, gdje se prvenstveno povećava udio tipskih

proizvodnih sistema (ovješena fasada s aluminijskim panelima, HPL, vlakno cementni, armiranobetonski paneli, kontinuirana i strukturalna ostakljena fasada, istezi i perforirani paneli, demit fasada...), ali i tehnologija koje se razvijaju kao odgovor na sve veći značaj fizike zgrade: kontaktna fasada s toplinskom izolacijom, ventilirana fasada. U međuratnom razdoblju imamo kontaktne fasade, u 2. polovici 20. stoljeća 1 ovješenu ostakljenu fasadu i 10 kontaktnih, a u 21. stoljeću među analiziranim primjerima uočavamo 10 kontaktnih fasada s toplinskom izolacijom, 13 ventiliranih fasada, 16 ovješanih metalnih ili ostakljenih fasada, od kojih 1 ostakljena ventilirana. Samo na pojedinim primjerima pokušalo se odgovoriti i na karakteristične lokalne uvjete – kišu (Zagrad, Građevinski fakultet), osunčanje (Zagrad, Građevinski fakultet, zgrade Studentskog standarda) i buru (stambeno-poslovne zgrade na Trsatu).

Sintetizirajući podatke o materijalima i tehnologijama u svijetu i riječkom području, te usporedbom zapažanja o podacima (izvadak iz sintetičke tablice je dan u Tablici 2, a komparativna zapažanja u Tablici 3 – u obje tablice zbog prostornog ograničenja prikazani su samo period 2. polovice 20. st. ili 21. st.) nastoji se dati odgovor na istraživačko pitanje br. 3.

U međuratnom razdoblju (analizirano je 20 primjera) u svjetskim primjerima dominantna je upotreba žbuke te kamena u primjerima skuplje izvedbe, a važnost dobivaju velike ostakljene stijene te trakasti prozori. U Rijeci je u ovom razdoblju također dominantna upotreba žbuke te kamena u primjerima skuplje izvedbe, pojavljuju se i velike ostakljene stijene te trakasti prozori. U drugoj polovici 20. st. u svjetskim primjerima možemo zamijetiti nekoliko faza razvoja fasada. U poslijeratnom razdoblju koristi se vidljivi armirani beton ili žbuka, a važni su detalji: kolorističke obrade, reljefi, mozaici i slično. U skupljim varijanti, posebno u SAD, razvijaju se ostakljene fasade, npr. sistem curtain-wall. Cijelo 20. st. koriste se i tradicionalni materijali kao što su fasadna opeka i kamen. Krajem 20. st. koriste se različiti materijali, a posebno se razvijaju metalne obloge. Na primjerima fasada iz svjetske arhitekture možemo pratiti dva različita stava – kombinirano korištenje više različitih materijala te pozornost prema teksturi i dubini fasade, ili jednoličnu monokromnu izvedbu volumena u pretežito jednom materijalu, nekad u skulpturalnom, a nekad u jednostavnom obliku. U poslijeratnom razdoblju u Rijeci izvedba fasada je većinom iz žbuke, ali sa posvećivanjem pažnje obogaćivanju fasada kromatskom obradom. Od 1960-ih u skupljim varijantama koriste se kamen i ostakljenja značajnih dijelova fasada, ali eksperimentira se i sa drugim oblogama: armiranim betonom, limom, prostornim rešetkama... Obrada fasada i definicija volumena su povezani te tvore cjelinu, što je posebno vidljivo kod razlomljenih volumena u centru grada ili kod objekta za kult.

Oba trenda su donekle u skladu sa svjetskim trendovima, ali su uočavaju dvije karakteristike: manja upotreba sistema curtain-wall i veća zastupljenost kombinacije različitih materijala i tehnologija u svim vrstama zgrada. U 21. stoljeću u svjetskim primjerima vidimo korištenje svih tradicionalnih te novih materijala, a posebno razvoj upotrebe stakla. Materijali se većinom koriste u kombinaciji, a nekad jedan materijal u potpunosti prevladava – većinom se tada radi o plemenitijim ili novijim materijalima: kamen, drvo, staklo, polikarbonat... Skulpturalni oblici volumena su sve češći, a fasade su često istaknute trodimenzionalne teksture ili dubine postignute dubokim perforiranim slojevima i mehaničkim sistemima.

Tablica 2. Usporedba materijala i tehnologija – izvadak

21.st. Opći trendovi	Vidljivi beton – beton sa završnom glatkom površinom, koriste se suvremeni betoni poput SCC betona Kamen – ravna linijska ploha, skulpturalno rezani Kamen – različite vrste kamena, kombinacije Staklo – staklene stijene Staklo – ovještene fasade (curtain-wall), s različitim stupnjevima istaknutosti nosivih profila Metalne legure – različiti materijali, profilirani limovi, perforirani lim, npr. prema slici... HPL ploče, vlaknocementne ploče – živih boja, različitih oblika Plastične mase – glatke površine, zakrivljene površine Boje – kromatizam, različite boje, prvenstveno kao dio materijala
21.st. Rijeka i okolica	Ožbukana fasada – na toplinskoj izolaciji se izvode završni premazi Vidljivi beton – beton sa završnom glatkom površinom Vlaknocementni paneli Armiranobetonski paneli - završni sloj beton ili drugi Kamen – ravna linijska ploha, nepravilne plohe Kamen – različite vrste kamena, kombinacije Staklo – staklene stijene Staklo – ovještene fasade (curtain-wall), s različitim stupnjevima istaknutosti nosivih profila, ventilirane fasade Staklo – trakasti prozori Metalne legure – dio pročelja, eksperimentiranje s različitim legurama: aluminij, profilirani limovi... Reljef – kao dio prefabriciranja ab ili vlaknocementnih panela Mozaik – koristi se rijetko, na vanjskim i unutrašnjim površinama Boje – kromatizam, različite boje, kao karakteristika materijala ili kao dodatno aplicirani sloj Brise-soleil – kao dio fasada, metalni

Tablica 3. *Usporedba trendova u korištenju materijala i tehnologija za fasade – izvadak*

21.st.	
Opći trendovi	<p>Može se primijetiti raznovrsnost materijala i tehnologija, kao što su žbuka, vidljivi beton, metalne obloge, staklene stijene, učestala upotreba metalnih legura za profile ostakljenja, korištenje novijih materijala kao što su vlaknocementni paneli, poliesterske ploče, HPL ploče...</p> <p>Posebno se ističe korištenje zakrivljenih površina, raznih obrada kao perforacija, ispisa, skulptoralnih oblikovanja, različita kromatika...</p> <p>Fasadna površina je jedan od osnovnih elemenata koji karakteriziraju oblikovanje zgrade: bojom, ali i teksturom. Karakteristična je upotreba svih vrsta materijala u kombinaciji u jednoj zgradi.</p>
Rijeka i okolica	<p>Može se primijetiti raznovrsnost materijala i tehnologija kao što su žbuka, vidljivi beton, metalne obloge, staklene stijene, učestala upotreba metalnih legura za profile ostakljenja te korištenje kamenih obloga.</p> <p>Posebno se razvijaju armiranobetonski paneli sa završnim slojem: kamen, kamena zrnca, reljef prema upotrebi matrica... (također i prefabricirani vlaknocementni paneli).</p> <p>Upotrebljavaju se prefabricirani paneli i istezi.</p> <p>Curtain-wall se rijetko primjenjuje.</p> <p>Fasadna površina je jedan od osnovnih elemenata koji karakteriziraju oblikovanje zgrade: ostakljene fasade, višeslojne ostakljene fasade, ventilirane fasade, brise-soleli...</p> <p>Puno se upotrebljavaju metalni elementi te se razvija upotreba ostakljenih fasada.</p> <p>Fasade su još uvijek većinom plošne, ali se mogu vidjeti i primjeri prostorno oblikovanih fasada, najčešće upotrebom nadstrešnica i brise-soleila.</p> <p>U poslovnim zgradama česta je upotreba metalnih obloga, rjeđe armirano betonskih.</p> <p>Stambena izgradnja je skromnije opremljena pa se koristi žbuka (kontaktna fasada s toplinskom izolacijom), a dojam se obogaćuje detaljima u staklu i metalu. Razvija se svijest o utjecaju klime pa se pojavljuje i ventilirana ostakljena fasada i elementi za raspršivanje vjetra.</p> <p>Osnovna kombinacija materijala je metalna obloga i ostakljenje. Zgrade su većinom definirane kao jednostavni volumeni.</p>

U Rijeci i okolici u 21.st. posebno je istaknuta upotreba metalnih panela za oblogu svih vrsta zgrada, od stambenih, poslovnih, do proizvodnih namjena. Ostakljenja su važan dio fasada, no samo na jednom primjeru je cijela zgrada izvedena s ovješenom fasadom. Koriste se različite vrste

materijala, no u principu se koristi jedan materijal (odnosno dva: u kombinaciji sa staklom) na jednostavnim kutijastim volumenima, bez ili sa malo detalja. Značajni odmak predstavljaju kompleks Zagrad u kojem se pojavljuje kombinacija fasada te se radi i na dubini fasade te zgrada u Agatićevoj, gdje su krov i fasada unificirani u jedinstveni volumen (no i ovdje se radi o jednom materijalu u kombinaciji sa staklom). Kombiniranje materijala i tehnologija je karakteristično i za Islamski centar, gdje je posebno značajna obloga kupola u kojoj je svaki dio posebno rađen u skladu sa svjetskim suvremenim trendovima i tehnologijama. Eksperimentiranje tehnologijama je više iskazano u zgradama koje su nastale u okolici Rijeke, kao u vrtiću u Baški (MF Arhitekti) i dvorani u Krku (Turato), gdje su spojeni aspekti tradicionalne gradnje s lokalnom proizvodnjom armiranog betona te u ventiliranoj ostakljenoj fasadi u zgradi na Trsatu (Ured MR2).

6. Zaključak

Razvoj tehnologija kroz suvremeno doba, od 2. polovice 20. stoljeća i u 21. stoljeću je i dalje rijetka tema istraživanja (posebno 21. stoljeće), a posebno s aspekta evolucije završnih radova, iako su upravo ovi radovi doživjeli izniman razvoj, možda usporediv s razvojem konstrukcija u 19. i na početku 20. stoljeća. Rad doprinosi boljem razumijevanju uloge fasadnih materijala i tehnologija u definiciji fasada na riječkom području od međuratnog razdoblja do danas, s posebnim težištem na suvremenu arhitekturu. Posebno se to odnosi na razumijevanje vremenskog razvoja fasada i promjene pristupa fasadama, utjecaj važnosti fasada i mogućih drugih karakteristika u definiciji zgrada te utjecaj različitih faktora na definiciju suvremenih fasada. Tijekom istraživanja utvrđeni su i neočekivani rezultati, npr. izvor inovativnosti u tradicionalnim lokalnim industrijama i građevinskim materijalima te suvremenom inženjerskom modeliranju. Uspoređujući materijale i tehnologije na primjerima riječkog područja kroz vrijeme uočavamo sve veći izbor materijala, a posebno varijantnih tehnologija. U 21. stoljeću vodi se računa o energetske učinkovitosti fasada, a izraženo je i korištenje predgotovljenih fasadnih elemenata.

Uspoređujući materijale i tehnologije na svjetskim i primjerima riječkog područja primjećujemo da razvoj i korištenje fasada u Rijeci i okolici slijedi njihovo korištenje u ostatku svijeta, iako u različitim periodima, od moderne do danas, ne nalazimo najskuplje varijante fasada. U periodu moderne u Rijeci i okolici se koriste osnovni materijali kao i u svijetu, ali na nešto skromniji način. U periodu nakon 2. svjetskog rata, pretežna je skromnija izgradnja čije fasade karakterizira žbuka. Od 1960-ih grade se bogatije opremljene zgrade pa se na fasadama poslovnih zgrada nalazi kamen (i to u pločama ravnih linija i glatkih ploha). Iako se radi o pojedinačnim

primjerima, fasade u Rijeci i okolici slijede trendove u estetici i tehnologiji. Javljaju se curtain-wall fasade, ali u manjem obimu nego u drugim državama, posebno u odnosu na SAD, a sama tehnologija je obično namijenjen samo za dijelove fasade. Jako je pak izraženo kombiniranje materijala i sistema. Skromnija izvedba je posebno vidljiva u suvremenoj arhitekturi, gdje su neki svjetski primjeri izuzetno tehnološki i financijski zahtjevni. U 21. stoljeću u Rijeci se kao i u svijetu koriste različiti materijali, ali s nekim razlikama: u riječkom kontekstu dominiraju metalne obloge te ponešto armiranobetonski i vlaknocementni paneli posebne obrade (također rijetki). Iako se sve više povećavaju površine ostakljenja, rijetke su potpuno ostakljene fasade ili fasade iz lameliranog stakla (nema ih). Nema izuzetno novih materijala (s nanotehnologijama, tekućim kristalima i slično) ili tehnologija (automatizirane fotosenzibilne fasade, led fasade i slično). Fasade većinom definiraju zgradu bojom. Manje je kombinacija materijala, a kompleks Zagrad je rijetki primjer bogato izvedene fasade (kombinacija materijala, dubina, boja, teksture...). Čest je princip apliciranja tipskih fasadnih sistema, što rezultira plošnim jednostavnim plohama fasada i jednostavnim volumenima. Značajno je nastavljanje tradicije kombinacije materijala i tehnologija na fasadama jednog objekta, a također se inovativniji pristupi javljaju na temelju tradicije domaće proizvodnje (reljefni armiranobetonski paneli i ventilirana ostakljena fasada su proizvedeni prema narudžbi kod lokalnih proizvođača), dok upotreba standardiziranih elemenata (npr. bond paneli..) često proizvodi neinventivna rješenja koja djeluju jednako neovisno o lokaciji i namjeni, a tada se uniformiranost uspijeva umanjiti samo iznimno bogatom paletom materijala i tehnologija.

Obrada fasade tijekom vremena nema uvijek istu važnost i nije uvijek glavni element definiranja oblikovanja zgrade. U moderni je stil zgrade prvenstveno definiran volumenom, a materijali su jednostavni i plošni. Nakon 2. svj. rata u svijetu fasade ponovo dobivaju trodimenzionalnost teksture, i različite boje, a slična pozornost se obraća definiciji volumena, kao i definiciji ploha. Možda je najveća razlika u svjetskim trendovima i u Rijeci vidljiva u 21. stoljeću, kada fasade u Rijeci ponovo gube trodimenzionalnost teksture.

U najbližoj fazi suvremene arhitekture u riječkom području možemo ustanoviti neke zanimljive fenomene kao što je znatno odstupanje u oblikovanju i fasadama obzirom na svjetske trendove, jer se u Rijeci preferiraju fasadne obrade ravnim panelima na jednostavnim volumenima, što je u srazu sa sve češćim skulpturalnim oblicima i dubokim fasadama te fasadama koje kombiniraju različite vrste materijala (učestale u svjetskim primjerima). Kao izuzetak pojavljuje se nekoliko primjera: SC Zamet, Centar Zagrad, a u okolici Rijeke vrtić u Baški i dvorana u Krku. U okolici Rijeke je

češće vidljivo korištenje fasada inspirirano tradicionalnim materijalima, prvenstveno kamenom, koji se pokušava upotrijebiti na novi način ili kao grafička inspiracija (prijenos vizualnih informacija, no bez prijenosa materijala). Pažnja prema fizici zgrade u lokalnim primjerima nije rezultirala inovativnim rješenjima već prvenstveno apliciranjem tipskih rješenja (kontaktna „demit“ fasada, ventilirana fasada s aluminijskim panelima). Samo u jednom primjeru, gdje je rađeno modeliranje ponašanja zgrade pri zagrijavanju i buri, rezultat je inovativno rješenje (zgrade na Trsatu ureda MR2), koje je također umanjeno ekonomičnom izvedbom.

Najinovativnija rješenja se pokazuju ona koja spajaju lokalnu proizvodnju s projektnim idejama, što rezultira novim načinima korištenja tradicionalnih materijala, zanimljivim vizualnim rješenjima ili inovativnim tehnološkim rješenjima te pristupi bazirani na modeliranju klimatskih pojava.

Ovi zaključci nam pokazuju i moguća daljnja istraživanja te rad može biti baza za istraživanje sljedećih tema: odnos proizvodnje i inovacija u suvremenoj gradnji, mogućnost poticanja suradnje projekatnata i lokalnih proizvođača, pristupi definiranja volumena i fasada na temelju suvremenog modeliranja zgrada, važnost ostalih oblikovnih elemenata (volumena i konstrukcije). Rad je također baza za daljnje povijesno istraživanje fasada i fasadnih tehnologija kroz arhivske dokumentacije radova. Posebno se uočava važnost i hitnoća organizacije arhivske građe 2. polovice 20. stoljeća koja se velikim dijelom možda i izgubila – krajem prošle države, pretvorbom i gašenjem brojnih poduzeća pa tako i projektantskih ureda – možda u vidu osnivanja instituta. Prikupljanjem ove građe moglo bi se doći do uvida u stvarni tijek projekta i izvođenja u poslijeratnom razdoblju i suvremenom dobu.

Literatura

- [1] Pevsner, N. (2006) *An Outline of European Architecture*. 1975. London : J. Murray. Original 1945. London: Penguin.
- [2] Giedion, S. (1954) *Space, Time and Architecture – The Growth of A New Tradition*. Cambridge: Harvard University Press, 1954 (Original 1941.)
- [3] Gössel, P., Leuthäuser, G. (2007) *Arhitektura 20. stoljeća*. Zagreb : V.B.Z.
- [4] Zakon o gradnji NN 153/13, 20/2017
- [5] Ching, F.D.K. (2014) *Building Construction Illustrated*, 5th Edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons
- [6] Palinić, Nana, (2009). *Rane armiranobetonske konstrukcije u riječkoj luci*. Građevinar, 2009, 61(5), str. 435-444.
- [7] Glavočić, D., ur. (1997). *Arhitektura secesije u Rijeci*. Rijeka: Moderna galerija.

- [8] Lozzi-Barković, J. (2010) *Secesija u arhitekturi Rijeke: arhitektura i urbanizam s početka 20. stoljeća 1900-1925*. Rijeka: Izdavački centar Rijeka.
- [9] Rotim-Malvić, J., ur. (1996) *Moderna arhitektura Rijeke: arhitektura i urbanizam međuratne Rijeke 1918.-1945*. Rijeka: Moderna galerija.
- [10] Lozzi-Barković, J. (2015) *Međuratna arhitektura Rijeke i Sušaka: usporedba i europsko okruženje*. Rijeka: Adamić.
- [11] UNESCO Mexico City Declaration on Cultural Policies. Final report. World Conference on Cultural Policies, Mexico City, 26 July - 6 August 1982, Pariz: UNESCO. <http://unesdoc.unesco.org/images/0005/000525/052505eo.pdf> (20.04.2018.)
- [12] Urevbu, A. O. (1997) *Culture and Technology: a Study on the 1997 Theme*. Pariz: World Decade Secretariat, Unesco
- [13] Anić, V. (2004) *Veliki rječnik hrvatskoga jezika*. Zagreb: Novi liber.
- [14] Simović, V. ur. (2002), *Leksikon građevinarstva*. Zagreb: Masmedia.
- [15] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Narodne novine 128/15
- [16] Groat L. N., Wang, D. (2013) *Architectural Research Methods*. 2. izdanje. New Jersey: John Wiley & Sons
- [17] Peulić, Đ. (2002) *Konstruktivni elementi zgrada*. 3. izdanje. Zagreb: Croatia knjiga.
- [18] Deplazes, A., ur. (2008) *Constructing Architecture: Materials, Processes, Structures: a Handbook*. Zurich: Darch Eth.
- [19] Torricelli, M.C., Del Nord, R., Felli, P. (2012) *Materiali e tecnologie dell'architettura*. Milano: Editori Laterza.
- [20] Vadstrup, S. (2008) *Conservation of Plaster Architecture on Facades - Working Techniques and Repair Methods*. Raadvad, Danska: Centre for Building Preservation.
- [21] Salavessa, E., Jalali, S., Sousa, L.M.O., Fernandes, L., Duarte, A.M. (2013) *Historical plasterwork techniques inspire new formulations. Construction and Building Materials*, 2013,48, str. 858-867.
- [22] Crnković, B., Šarić, Lj., (2003) *Građenje prirodnim kamenom*. Zagreb: IGH.
- [23] Škunca, S. (2014) *Koloristička obrada pročelja višestambene riječke arhitekture druge polovice 20. stoljeća kao polazište obnove kroz projekt podizanja energetske učinkovitosti Sveučilište u Rijeci*. U: Arbanas, Ž., ur. Zbornik radova Građevinskog Fakulteta Sveučilišta u Rijeci. XVII. Rijeka, Građevinski fakultet, str. 177-196
- [24] Glavočić, D., Rotim-Malvić, J., Škunca, S. (2017) *Riječka radnička naselja*. Rijeka: Pro Torpedo.
- [25] Schwalba, R., Dobrović, E. (1999) *Igor Emili*. Rijeka: Muzej Grada Rijeke.
- [26] Dubrović, E. (2006) *Ninoslav Kučan, katalog izložbe*. Rijeka: Muzej grada Rijeke.

NEBODERI - GRAD MEĐU OBLACIMA

SKYSCRAPERS - CITY IN THE CLOUDS

Gorana Stipeč Brlić*

Sažetak

Projekt „Neboderi - grad među oblacima“ pokrenut je od strane skupine studenata i stručnjaka iz područja arhitekture, krajobrazne arhitekture i dizajna pod zajedničkim nazivom „Sekcija“. Koncept projekta je prijavljen u srpnju 2017. godine na natječaj Hrvatske komore arhitekata te je bio izabran kao jedan od jedanaest projekata od važnosti za struku od ukupno četrdeset prijavljenih. Početna ideja istraživanja identiteta, ispitivanja mišljenja građana, pregled arhivskog materijala i provedba radionica izrasla je u trodnevni festival posvećen stambenim tornjevima grada Rijeke.

Ključne riječi: riječki identitet, stambeni tornjevi, neboderi

Abstract

The project “Skyscrapers – city in the clouds“ was initiated by a group of students and experts in architecture, landscape architecture, and design, called “Sekcija“. The project was selected by the Croatian chamber of architects as one of the eleven projects of great interest for Croatian architecture selected in 2017. The initial idea was to investigate identities, create polls on citizens’ opinions and facilitate workshops; but this idea quickly grew into a three-day festival dedicated to the city of Rijeka skyscrapers.

Key words: Rijeka's identity, vertical housing, skyscrapers

*Građevinski fakultet u Rijeci
E-mail: goranash@uniri.hr

1. Uvod

Analizom riječke panorame i tipičnih urbanih struktura prepoznajemo riječke nebodere koji svojim vertikalama oblikuju poglede na grad. Prvi riječki neboderi građeni su u prvoj polovici dvadesetog stoljeća predstavljajući simbole dvaju suprotstavljenih strana u Gradu - Italije i Sušaka (Hrvatske). Tako nastaju Riječki (1939.) i Sušački neboder (1947.), od kojih je prvi stambene namjene, a drugi je smještajni dio hotela. O političkom rivalstvu koje se zrcalilo u gradnji ove dvije građevine piše Radmila Matejčić u knjizi „Kako čitati Grad“ [1]. Stambeni neboderi gradili su se najvećim intenzitetom pedesetih i šezdesetih godina prošlog stoljeća, na lokacijama ulaska u grad kao dominantni predstavnici ili kao interpolacije u naseljima obiteljskih kuća. Nakon početnog ushita u gradnji, sedamdesete godine donijele su stagnaciju te se takve višekratnice više ne grade. Većina riječkih stambenih nebodera ima visinu od najviše 26 etaža (96m), što je u svjetskim razmjerima malo viša stambena građevina. Trenutno najviši stambeni neboder na svijetu nalazi se u New Yorku, na adresi 432 Park Avenue, i visok je 426m. Pred dovršetkom je i budući najviši stambeni neboder, također u New Yorku koji će biti visok 238m [2]. Najbliže službenoj definiciji nebodera na području Hrvatske nalazimo u Pravilniku o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara [3, 4], koji svrstava nebodere u visoke zgrade, odnosno među sve one više od 22m.

2. Dosadašnje studije

Iako vizualno istaknuti, ne postoji mnogo istraživanja ili projekata koji se bave riječkim stambenim tornjevima. O razvoju takvih naselja piše Srđan Škunca u svom doktorskom radu na temu urbanizma Rijeke između 1945. i 1974. godine [5], gdje se dotiče i teme nebodera kao npr. Vulkanovog nebodera, arhitekta Ninoslava Kučana na Pećinama. U poglavlju o interpolaciji stambenih tornjeva, kroz rekonstrukciju pojedinih naselja nakon 1964. godine, smatra da se gradnjom nebodera podilazilo građevinskim poduzećima pod utjecajem političkih strujanja, utječući na izmjene urbanističkih planova, što su isti iskoristili za gradnju što većeg broja stanova na što manjoj površini.

Fenomen gradnje nebodera nije zaobišao ni Zagreb pa tako nalazimo studiju Sanje Gašparović i Nikše Božića [6], provedenu u sklopu poslijediplomskog znanstvenog studija pri Arhitektonskom fakultetu u Zagrebu, u kojoj istražuju stajališta stanara prema stanovanju na višim katovima u neboderima na području Grada Zagreba. Anketirani su stanovnici Siska i Rijeke kako bi se dobio rezultat koliki je postotak onih koji

bi željeli živjeti na višim katovima. Zanimljivo je da bi se stanovnici Siska odlučili za život na višim katovima samo u 0,3%, dok je Riječana 12%.

3. Istraživanje

3.1. Pregled i analiza primjera stambenih nebodera

Pregledavajući arhivsku građu u Državnom arhivu grada Rijeke i Muzeju Grada Rijeke, među autorima arhitekture prepoznajemo neke od najznačajnijih riječkih arhitekata druge polovice dvadesetog stoljeća, kao što su Igor Emili i Ada Felice Rošić. Stambene tornjeve i većinu opusa ne toliko poznate Ade Felice Rošić predstavila je Lidija Butković Mičin izložbom i popratnim katalogom „Ada Felice-Rošić i Nada Đilović - Ženski trag u arhitekturi Rijeke“ [7], u kojem piše kako su stambeni tornjevi na Kozali najkontroverzniji projekt arhitektice. Da bi se neboderi izgradili, bilo je potrebno srušiti gornje kapele-postaje i raspela križnog puta na Kalvariji (vrijednog povijesnog spomenika) te je struka negativno reagirala, a razgranati tlocrt je bio novost u takvoj gradnji te se stabilnost armirano betonske konstrukcije dodatno provjeravala tražeći više mišljenja. Na području grada Rijeke u naselju Turnić izgrađeni su i svojedobno najviši (96m) stambeni neboderi u Jugoslaviji koje i danas prati nadimak „neboderi smrti“. Najeksponiraniji stambeni neboderi, smješteni tik uz riječku zaobilaznicu, a poznati među građanima po imenu „Eševi“, imaju 24 stambena kata i visinu od 90m.



Slika 1. Pojednostavljeni grafički prikaz naselja nebodera obuhvaćenih istraživanjem [8]

3.1.1. Podmurvice

Godina izgradnje: 1965.–1968.; Glavni projektant: Igor Emili; Odgovorni projektanti: T. Pilepić, R. Vukelić, I. Emili; Broj katova: P+14; Visina: 35m; Investitor: G.P – „Vladimir Gortan“ Zagreb

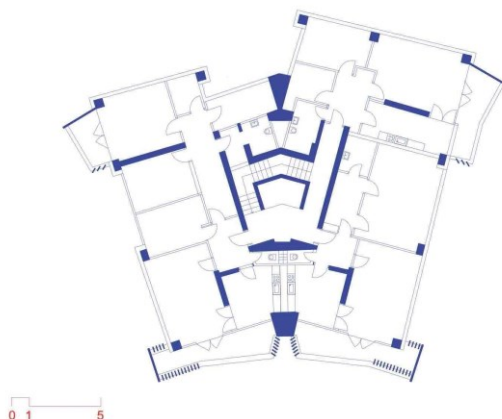
Serija od sedam stambenih nebodera smještena je na Podmurvicama. Osim skulpturalnog oblikovanja vanjskog plašta, dodatno ih upečatljivima čini kompleksna konfiguracija terena te nogometno igralište u njihovom podnožju (Slika 1).

Neboderi prostorno prate liniju horizontalno položenog blago ukrivljenog slova „S“. Formu presijeca pristupna cesta na koju se priključuju pristupne ulice nebodera. Takvom prostorno-urbanističkom linijom tornjevi su uklopljeni u krajolik u blagom padu. Parkirališna mjesta i površine za parkiranje okružuju svaki pojedini neboder. Pročelje visokog prizemlja, s perforacijama, uvučeno je u odnosu na gornje katove te odaje dojam da se volumen stanova oslanja na transparentnu bazu.



Slika 2. Fotografija stambenih tornjeva na Podmurvicama (arhiv Muzeja Grada Rijeke)

Svaki objekt sastoji se od 105 do 110 stanova. Trokutasta tlocrtna forma sa skošenim bočnim stranicama osigurala je orijentaciju stanova prema južnoj, istočnoj i zapadnoj strani, otvarajući najzanimljivije vizure riječkog zaljeva svim stanarima. (Slika 2) Komunikacijska jezgra sa stubištem i dizalima postavljena je u sredini nebodera.



Slika 3. Tipični tlocrt stambenih tornjeva na Podmurvicama [8]

Karakteristična etaža (Slika 3) sadrži tri stana. Arhitekt je postavljao veće i manje lođe, ukupno po četiri na svakom katu, a svaki stan ima najmanje jednu.

Lođe su oblikovno naglašene dizajnim brisolejima i parapetima koji definiraju oblikovni i vizualni karakter nebodera. Projektantski potpis na ovim neboderima vidljiv je u najsitnijim detaljima poput rigalica za vodu koje su vidljive na povijesnim fotografijama nebodera, a kao detalj nepoznat u arhitekturi tornjeva no već prepoznatljiviji kod obiteljskih kuća.

Arhitektonska posvećenost detalju na ovim zgradama donosi osjećaj privlačnosti i mekoće, u osnovi potpuno suprotan energiji pojma armiranobetonskih tornjeva.

3.1.2. Kozala

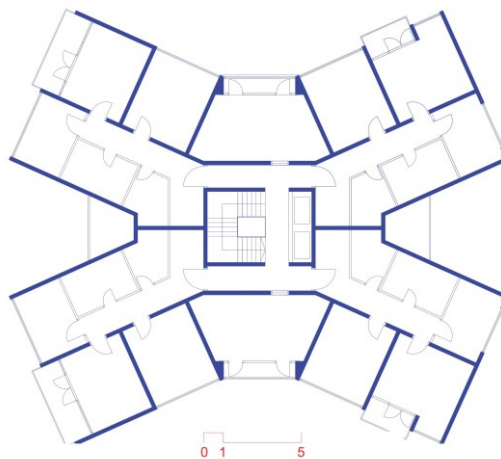
Godina izgradnje: 1969.–1973.; Glavni projektant: Ada Felice-Rošić, dipl. ing. arh. Čedomir Mašić, dipl. ing. arh. (PB GP Primorje, Rijeka); Broj katova: K1-K3 - P+21; K4-K7 - P+12; Visina: K1-K3 69m; K4-K7 - 35m ; Investitor GP Primorje, Rijeka



Slika 4. Fotografija stambenih tornjeva na Kozali (arhiv Muzeja Grada Rijeke)

Kompleks nebodera na Kozali (Slika 4) sastoji se od sedam objekata koji prate liniju tjemena brda Goljak iznad kanjona Rječine. Objekti su orijentirani sjever-jug te se ističu zvjezdastim tlocrtom u obliku slova X. Razvedenost volumena omogućila je optimalnije vizure i insolaciju stanova.

Prezentirani stambeni toranj pripada nizu od četiri dvanaesterokatnice, uz koje su kasnije izgrađena tri stambena tornja od dvadeset i jednog kata. Gradnja dvaju nizova stambenih tornjeva formirala je specifični urbani „otok“ u sklopu naselja Kozala, ističući se i u vizuri samog grada Rijeke, nasuprot trsatskim padinama. Planerske ideje vide se u programskim namjenama susjednih građevina, tako se u neposrednoj blizini nalazi škola, vrtić, trgovina, sportska dvorana, sve što omogućuje jednostavniju organizaciju dnevnih aktivnosti prosječne obiteljske zajednice. Uz suteran i visoko prizemlje, svaki objekt ima i funkcionalnu krovnu etažu, gdje je terasa jednim dijelom predviđena kao prohodni prostor.



Slika 5. Tipični tlocrt stambenih tornjeva na Kozali [8]

Tlocrt zrakaste forme (Slika 5) objedinjuje centralna nosiva jezgra sa stepeništem i dva dizala. U pravilu, svaki je „krak“ projektiran za jednu stambenu jedinicu koja ima tri pročelja te sa susjednim stanom dijeli samo jedan manji nosivi zid uz jezgru. Dnevni prostori, kao što su kuhinja i dnevni boravak, orijentirani su na dužu fasadu te imaju lođu. Između stanova nalazi se servisni prostor kata.

Analizom tlocrtne sheme tornja primjećuje se težnja za omogućavanjem intimnosti i neovisnosti stambenih jedinica, bez obzira na to što se nalaze u zgradi s velikim brojem katova i stanara. Fasadna ploha je maksimalno razvedena, što rezultira novom kvalitetom unutar kolektivnog stanovanja.

Originalni projekt Ade Felice-Rošić za tornjeve od 12 katova na Kozali je izveden četiri puta, da bi naknadno bio prerađen za posljednje tri realizacije u nizu. U toj varijanti od 21. kata neboderi imaju ukupno 84 stanova te 19 prostorija različitih namjena.

3.1.3. Turnić – „neboderi smrti“

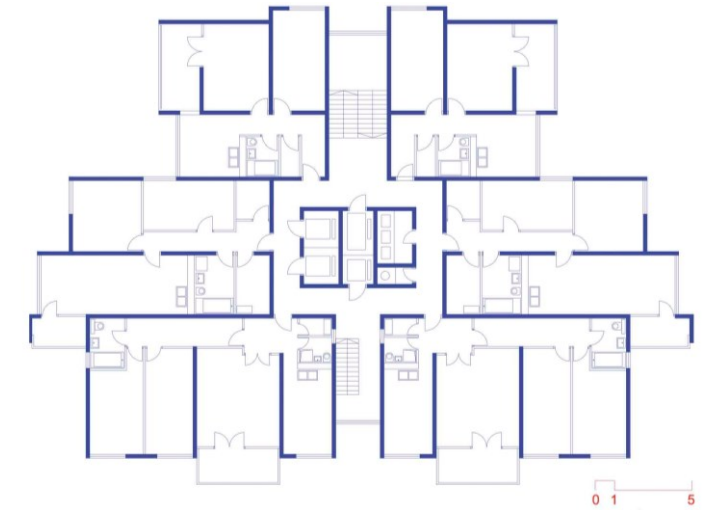
Godina: 1975.; Glavni projektant: D. Sironić, dipl. ing. arh. (PB GP Vladimir Gortan, Zagreb); Broj katova: P+2+28; Visina: 96m; Investitor: GP Vladimir Gortan, Zagreb; Izvođač: Adriamont, Rijeka

Neboderi-blizanci na adresi Franje Čandeka 23a i 23b na Turniću najviši su stambeni neboderi u Hrvatskoj, a u vrijeme njihove gradnje bili su najveći stambeni neboderi na području bivše Jugoslavije (Slika 6). Poduzeće Vladimir Gortan iz Zagreba, kao i njegov građevinski pogon u Rijeci, bio je investitor ili izvođač velikog broja stambenih nebodera u razdoblju najpropulzivnije primjene ove tipologije od kraja 1960-ih do kraja 1970-ih godina, uključujući i Emilijeve nebodere na Podmurvicama.



Slika 6. Fotografija nebodera u gradnji na Turniću (arhiv Muzeja Grada Rijeke)

Prizemna etaža nebodera nalazi se u denivelaciji od glavne prometnice. Na koti etaže nalazi se ulaz u robnu kuću, koju danas poznajemo pod imenom „Andrea“. U njoj se nalazi tržnica, manji uslužni obrti i ugostiteljski objekti. Drugi ulaz u robnu kuću nalazi se na koti glavne ceste, kao i glavni ulazi u stambene tornjeve. Dvije etaže nebodera ispod kote glavne ceste predviđene su za poslovne prostore. Uz nebodere se nalazi i veće parkiralište za stanare, a ispred glavnih ulaza je i autobusno stajalište.



Slika 7. Tipičan tlocrt nebodera na Turniću [8]

Tlocrtna dispozicija stanova ukazuje na razgranatu formu, gdje svaki stan ima dvije ili tri vanjske fasade. Tlocrt tipične etaže (Slika 7) je osno simetričan, oko središnje komunikacijske vertikale smješteno je šest stanova. Stanovi su podijeljeni u tri tipologije koje se međusobno razlikuju po veličini i organizaciji prostorija. Svaki stan ima vlastiti balkon.

Dinamiku fasade oblikuju različiti prozori i balkoni, formirajući vertikalne linije različitih dubina koje vizualno sužavaju volumen nebodera. Balkoni su orijentirani na tri strane svijeta, osim na sjevernu. Zbog njihove visine, nebodere blizance pratio je nadimak „neboderi smrti“, iako se taj nadimak danas češće koristi za neboder na suprotnoj strani ulice, na adresi Franje Čandeka 8, zbog problema s otpadanjem dijelova fasade.

3.1.4. Rastočine

Godina: 1973.; Glavni projektant: Ante Scarpa, dipl. ing. arh. (PB GP Primorje, Rijeka); Projektant konstrukcije: Zdravko Tomljanović, dipl. ing. građ.; Projektant faze: Ljerka Vukonić, arh. teh.; Broj katova: P + 25/26; Visina: 80m Investitor: GP Primorje, Rijeka

Pet stambenih nebodera, poznatijih kao "Eševi" (Slika 8), smješteni su na izravnom platou na Rastočinama, okruženi naseljem obiteljskih kuća sa svoje južne i jugoistočne strane te gradskom zaobilaznicom sa sjeverne.



Slika 8. Fotografija naselja 'Eševa' u tijeku gradnje (arhiv Muzeja Grada Rijeke)

S lokacije se pružaju izvrsne vizure prema Kvarnerskom zaljevu te otocima Krku i Cresu. Izvedeno je ukupno pet nebodera u nizu, a svi su građeni prema ruskim standardima, predviđajući samo jedno motorno vozilo na jedanaest stanova. Neodgovarajući pristup prostornom planiranju danas se očituje u manjku parkirnih površina za naselje od oko 700 stanova.

U nizu tornjeva izvedena je i prizemna građevina dječjeg vrtića Rastočine te predstavlja jedini javni sadržaj u neposrednoj blizini stambenih zgrada. Stambeni neboderi su u arhitektonsko-kompozicijskom kao i funkcionalnom pogledu potpuno identični.

Tlocrtna razvedenost objekta omogućila je optimalnu orijentaciju u odnosu na sve strane svijeta.



Slika 9. Tipičan tlocrt nebodera na Rastočinama [8]

U karakterističnoj etaži (Slika 9) projektirano je šest stanova, od toga tri trosobna, dva dvosobna i jedan jednosobni stan. Svi stanovi, osim stanova u prizemlju i po jednog stana na katovima, imaju lođu. Krovne etaže imaju dovod vode i mali tuš.

„Eševi“ su za GP Primorje označili početak primjene tehnologije tzv. tunelske (klizne) oplata koja je omogućila bržu i ekonomičniju izgradnju visokih stambenih zgrada. Taj sistem gradnje među hrvatskim građevinskim tvrtkama prva je uvela zagrebačka Industrogradnja krajem 1960-ih godina, koja se sredinom 1970-ih nastojala nametnuti u riječkoj stanogradnji investicijama poput stambenih nebodera u Čandekovoj ulici na Turniću.

3.2. Istraživanje među stanarima

Kako bi se utvrdio odnos stanara prema života u neboderima i otkrile potrebe i mogući potencijal prostora, u kolovozu 2017. provelo se anketiranje javnosti u zgradama koje su se nalazile u naseljima sa nekoliko višekatnica. Budući da je anketiranje moralo biti organizirano u dogovoru sa predstavnikom stanara, u svakom od naselja odabrana je jedna višekatnica. Ankete su podijeljene u poštanske sandučiće, a iste bi bile vraćane u sandučić kućnog savjeta. Odaziv na ankete je bio relativno slab, tako da se u neboderu na adresi Rastočine 6 kroz razdoblje od deset dana prikupilo tek petnaest anketa (Slika 10).

3.2.1. Opis uzorka i pregled rezultata

Pitanja u anketi formirana su na način da se pretpostavilo da će odgovori ovisiti o starosti ispitanika. Većina ispitanika (46%) imala je između 30 i 50 godine, a 53% su činile žene. 40% ispitanika živi u kućanstvu sa dvoje ukućana, a 66% njih je zadovoljno veličinom stambene površine u kojem žive. 60% ispitanika poželjelo je veći balkon.



Slika 10. Dijeljenje anketa po zgradama [8]

Potrebno je bilo ispitati stav stanara prema dijeljenju zajedničkih prostora i koji bi prostori prema njihovom mišljenju bili najpogodniji. 93% ispitanika smatra hodnik zajedničkim prostorom, krov njih 80%, ulaz njih 86%. 73% misli da zajednički prostori nisu dovoljno iskorišteni, njih 73% nije nikada bilo na krovu zgrade, a 93% bi željelo imati pristup krovu. Istraživalo se i mišljenje o mogućoj novoj namjeni koja bi doprinijela kvaliteti života te je većina anketiranih stanara, njih 86%, poželjela urbani vrt, 66% je izrazilo potrebu za prostorom za druženje, a 46% bi voljelo da imaju ležaljke na krovu.

3.2.2. Zaključak

Nakon provedene ankete zaključilo se da postoji potreba za dodatnim zelenilom i korištenjem krova kao društvene površine. Kako bi stanarima ponudili što kvalitetniji prikaz mogućnosti, odlučilo se organizirati dvodnevnu arhitektonsku radionicu s ciljem osmišljavanja idejnih rješenja za krovne terase nebodera.

4. Doprinos kvaliteti života u neboderima

Nakon provedenog anketiranja i istraživanja arhivskog gradiva organizirana je arhitektonska radionica. Kroz izložbu arhivskog gradiva javnost se upoznala s povijesnim kontekstom i podacima o gradnji, a radionica bi trebala iznjedrili ideje u svrhu realizacije projekta koji bi poboljšao kvalitetu života u takvim kolektivima.

4.1. Provedba arhitektonske radionice 'Urbani vrtovi'

Sudionici radionice: Martina Mataija, aps. arh., Ana Lokas, aps. arh., Ana Orlić, aps. arh., Nikolina Malbaša, mag. ing. prosp. arh., Mate Rupić, mag. ing. prosp. arh., Maria Ljuština stud. arh., Anastazija Stjepanović, stud. arh., Nikolina Jurić mag. ing. prosp. arh., Mirta Stipeč, mag. ing. prosp. arh., Damian Sobol Turina, aps. arh., Katarina Šantić, aps. arh.; gost predavač: Bojan Bilić, dipl. ing. arh.; Mentor: Gorana Stipeč Brlić, mag. ing. arh.

Predmet radionice bio je preuređenje i prenamjena dijela krova stambenog nebodera Š-6 na Rastočinama u urbani vrt za stanare. Cilj je bio pronaći rješenja koja bi pridonijela većoj iskoristivosti zajedničkih prostora stanara, omogućila rasterećivanje partera i potaknula stanare na brigu i sanaciju zajedničkih prostora. Uvodno izlaganje o urbanitetu grada na Rječini održao je Bojan Bilić, riječki urbanist.

4.1.1. Analiza lokacije

Lokacija nebodera na Rastočinama je slabo povezana javnim prijevozom s okolicom te ima kronični nedostatak javnih prostora i parkirališta. Parter oko stambenih zgrada u potpunosti je zauzet parkirnim mjestima. Prepoznata je potreba za osiguravanjem novog prostora za druženje, igru i slično. Na lokaciji ne postoje veće zelene površine, već samo pojedinačni ostaci zelenila nedostatni za toliki broj korisnika (u jednom neboderu živi oko petsto stanara). Prohodan krov nebodera, ograđen visokom ogradom (cca 130cm), prepoznat je kao potencijalni multifunkcionalni prostor koji bi služio druženju i boravljenju stanara, uzgoju bilja, zajedničkim sastancima i događanjima.

4.2. Rezultati radionice

Sudionici radionice ponudili su različite odgovore na zatečeno stanje krova. Pritom su svi uređenjem pokušali riješiti prvenstveno problem vizualne i funkcionalne sanacije odušnika za ventilaciju na prohodnom krovu te zaštitu od vjetra i pričvršćivanje novih elemenata

4.2.1. Tetris top, Vrt na šestom nebu i Urbani vrh

Sudionici radionice podijeljeni su u tri skupine od kojih su svaku činila dva arhitekta i barem jedan krajobrazni arhitekt. Skupina „Tetris top“ orijentirala se na različite konceptualne prostore u zoni krova formirajući zone za igru, druženje i sadnju bilja. U zoni za djecu predvidjeli su tartan obloge, odušnike i gromobran zaštitili vertikalnim gredicama, a na južnoj strani krova predvidjeli su prostor za druženje (Slika 11).



Slika 11. Prostorna vizualizacije idejnog rješenja skupine „Tetris top“ [8]

Skupina „Vrt na šestom nebu“ bavila se problemom materijalizacije i što jednostavnije realizacije budućeg urbanog vrta te su osmislili vertikalne grede iz mreža koje se mogu modularno postavljati na različite lokacije, a rešetkasta struktura omogućuje jednostavno vješanja i premještanja vaza (Slika 12).



Slika 12. Prostorna vizualizacije idejnog rješenja skupine „Vrt na šestom nebu“ [8]

Skupina „Urbani vrh“ koncentrirala se na oblikovanje i dizajnirala gredice u formi pravokutnika koje bi se, ovisno o potrebi stanara, izvodile u različitim dimenzijama. Razmišljali su o taktilnosti površina te su u ideji predvidjeli drvenu oblogu poda i gredice obložene drvenim letvicama i limenom oblogom (Slika 13).



Slika 13. Prostorna vizualizacija idejnog rješenja skupine „Urbani vrh“ [8]

4.2.2. Zaključak radionice

Uređenje krova nebodera Š-6 zamišljeno je kao pilot projekt. Svojom pojavnošću i idejama projekt bi trebao pokazati mogućnosti i potencijale višestambenih zgrada te poslužiti kao ogledni primjer budućih projekata uređenja.

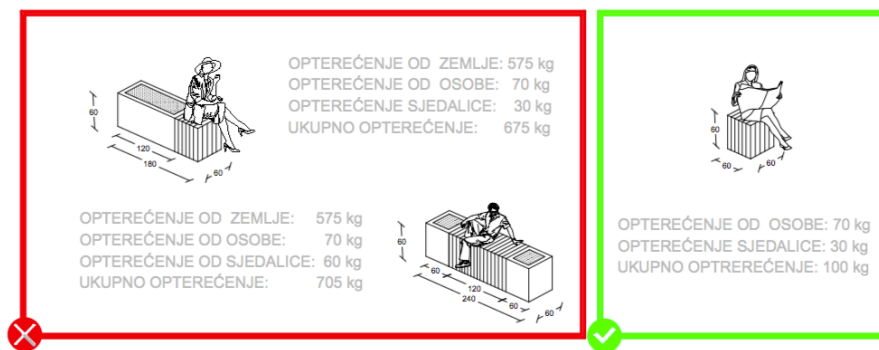
4.3. Suradnja s Građevinskim fakultetom

Kroz projekt je ostvarena suradnja s Građevinskim fakultetom u Rijeci, čiji su studenti pod mentorstvom dr. sc. Paula Šćulca izradili procjenu izvedivosti projekata uzevši u obzir nosivost i utjecaj vjetra. Na projektu su sudjelovale studentice Ivana Blagdan, Nina Čepić, Simona Gavez i Patricia Jovanović-Verbanac.

4.3.1. Analiza dostupne dokumentacije

Najprije se postavilo pitanje je li krov uopće projektiran kao prohodan. Pregledom tehničke dokumentacije iz Državnog arhiva u Rijeci utvrđeno je da je krov projektiran kao prohodan, ograđen zidom i djelomično ogradom te da projektirano uporabno opterećenje iznosi 200 kg/m^2 . Nosivu konstrukciju nebodera čine armiranobetonski zidovi u dva smjera debljine 20 cm i armiranobetonske ploče debljine 15 cm koje djeluju kao horizontalne krute dijafragme koje prenose horizontalne sile (vjetar,

potres) na sve zidove. Studenti su za model prema kojem su računali moguće opterećenje novih elemenata uzeli vazru projektiranu u jednom od idejnih rješenja uređenja krova, uzimajući u obzir težinu zemlje u gredici, dimenzije i tlocrtnu poziciju gredice na krovu. Preuzeti model gredice je izrađen iz lima i drvenih letvica, širine 80cm, dužine 180cm, visine 60cm, gdje je sloj zemlje debljine 30cm (Slika 14).



Slika 14. Shematski prikaz izračuna opterećenja prema modelu tipične gredice [8]

4.3.2. Smjernice

Pri uređivanju krova i postavljanju novih elemenata urbanog vrta na njemu preporuča se da se teži objekti postave iznad nosivih armiranobetonskih zidova te da raspodjela opterećenja na ploču bude što ravnomjernija. Posebnu pozornost pri projektiranju novih elemenata urbanog vrta na krovu treba obratiti na djelovanje vjetrova. Ne preporuča se postavljanje gredica za penjačice, vaza i sličnih objekata veće visine od ograde uz rubove krova zbog udara vjetrova i mogućnosti pada predmeta s velike visine. Budući je promatrani krov trenutno nedostupan stanarima zgrade, nije poznato koliko na krovu „stvarno puše“ pa se, prije izvedbe novih elemenata urbanih vrtova, preporuča na samom krovu provesti testno ispitivanje s postavljanjem probnih elemenata opreme kako bi se „iz prve ruke“ utvrdila mogućnosti njihove primjene.

5. Festival „Neboderi - grad među oblacima“

Nakon anketiranja, provedene radionice i pregleda arhivskog materijala sve rezultate željelo se izložiti javnosti na poučan i angažiran način. Tako se pristupilo organizaciji trodnevnog festivala. Koncept festivala je bio podijeljen u tri dana s tematski odvojenim cjelinama. Jedan dan je bio namijenjen direktnoj komunikaciji sa stanovnicima naselja Rastočine, drugi

dan je bio usmjeren široj javnosti kroz panel diskusiju sa stručnjacima iz različitih polja znanosti i struke, a treći dan simbolički je proveden u Hotelu Neboder, gdje su posjetitelji imali prigodu razgledati Rijeku sa zadnjeg kata nebodera i na par sati biti gosti svoga grada.

5.1. Prvi dan - prezentacije na lokaciji i razgledavanje

Festival je otvoren u Dječjem vrtiću Rastočine, a prvi je dan bio namijenjen predavljanju ideje uređenja urbanog vrta na krovu nebodera na adresi Rastočine 6 (u daljnjem tekstu Š-6).

Zagrebačka arhitektica Cvijeta Bišević okupljenim je stanarima objasnila važnost urbanog zelenila te njegovog utjecaja na mikroklimu i čistoću zraka u urbanim sredinama. Naglasila je da je najvažniji faktor za proizvodnju vlastite hrane u gradovima kvalitetno tlo te njegova proizvodnja in-situ metodom kompostiranja i prerađivanja organskog otpada iz kućanstva.

Usljedile su prezentacije Sekcije, skupine studenata i mladih inženjera. Tri projektne skupine predstavile su svoju viziju uređenja krova stambenog nebodera Š 6. Novouređeni prostori bili bi namijenjeni svim stanarima te je želja dizajnera da prostor krova, iako urbani vrt, služi kao multifunkcionalni dnevni boravak za sve dobne skupine. Studenti Građevinskog fakulteta u Rijeci, zajedno sa svojim mentorom, dr. sc. Paulom Šćulcem, predstavili su statička ograničenja uređenja krovnog prostora te modele utjecaja vjetra. Nakon prezentacija posjetioци su mogli glasati za najbolje rješenje. Od ukupno 23 predana glasačka listića, većina (9 listića) je glasala za rješenje pod nazivom „Tetris top“.

Kao zaključak festivalskog dana po prvi puta je za javnost otvoren pristup krovnoj terasi nebodera Š-6. Većina posjetitelja je po prvi put u životu imala prilike vidjeti Rijeku sa visine od 80m, a dio stanara prvi puta je hodao zajedničkim prostorom koji je većinu vremena zaključan.



Slika 14. Posjetitelji razgledavaju grad s krova nebodera na adresi Rastočine 6 [8]

5.1.1. Eksperimentalna knjižnica

Prisutnima su potom podijeljene sadnice mente i pelina, koje su prethodno posadila i vaze oslikala djeca iz vrtića Rastočine uz pomoć članica Sekcije. Vrhunac otvorenja dogodio se nakon predavanja, u obliku organiziranog vođenja po krovu nebodera Š 6, gdje su svi zainteresirani mogli razgledati krov.

Paralelno uz projekt Neboderi, u portunu stambenog nebodera Š 6, odvijao se i projekt zajedničke knjižnice. Knjižnica je ostvarena kroz projekt „Škurinjski susjedi“, Udruge za urbanu regeneraciju Kuraž, a za cilj ima pokazati je li moguće uvesti jedan skladni sistem posuđivanja i vraćanja knjiga unutar zajednice od oko petsto stanara. Za sada knjižnica sadrži stotinjak naslova, posloženih na jednu policu, a tu su i pravila korištenja koja propisuju da se knjiga može, na primjer, držati najviše pet dana i svatko posudbu mora zabilježiti na papir. Do danas (siječanj 2018.) knjižnica još uvijek funkcionira, a stanari i dalje uredno posuđuju i vraćaju knjige.

5.2. Drugi dan festivala - stručna tribina

Drugi dan festivala zamišljen je kao stručna panel diskusija i izložba u prostorima Društva arhitekata Rijeka.

Dan je započeo uz riječku povjesničarku umjetnosti Lidiju Butković Mićin, koja se u svom radu fokusira na arhitekturu nastalu iza drugog svjetskog rata. Predstavila se predavanjem „Čovjek (ni)je ptica: urbani kontekst riječkih stambenih nebodera“. Povijesnim „crticama“ iz tiskanih medija toga doba na temu se nadovezao povjesničar Kristian Benić iz

Gradske knjižnice Rijeka svojim predavanjem „Javna percepcija riječkih nebodera pljuverskih sedamdesetih: nekoliko sličica...“.

Nakon predavanja uslijedilo je otvorenje izložbe fotografija i nacрта osam odabranih nebodera pod nazivom „Nekad vs. Sad“. Izložbom su obuhvaćeni neboderi iz planiranih riječkih naselja: Gornja Vežica, Sušak/Podvežica, Kozala, Rastočine, Turnić, Podmurvice, Zamet i Kantrida. Kroz izložbu je predstavljena arhivska građa poput nacрта i starih fotografija te makete riječkih nebodera. Posjetitelji su mogli interaktivno usporediti veličinu, orijentaciju i tlocrtnu dispoziciju nebodera uz zanimljive crtice o svakome od njih.

Zaključak drugog dana festivala obilježio je okrugli stol s predavačima: Leo Modrčin- arhitekt i projektant, Luka Skansi - povjesničar arhitekture, Srđan Škunca, pročelnik Gradskog odjela za urbanizam te Barbara Kalebić Maglica – psihologinja. Uz stručno moderiranje Lidije Butković Mićin, gosti su komentirali kontekst nastanka riječkih nebodera te njihove današnje probleme. Naglašeno je da su stambeni tornjevi bili najefikasniji način zbrinjavanja masovnog nedostatka stambenih prostora 60-tih i 70-tih godina prošloga stoljeća.

Kroz razgovor je zaključeno da, iako tipološki i urbanistički često problematične građevine, neboderi predstavljaju bitnu odrednicu identiteta i potencijal za buduće djelovanje.

5.3. Treći dan festivala - Hotel Neboder i HKD

Treći, završni dan festivala zamišljen je kroz prigodno druženje u hotelu Neboder na Sušaku. Posjetioci su mogli razgledati riječku arhitektonsku ikonu 30-tih godina te prisustvovati izložbi o Alfredu Albiniju i Josipu Pičmanu, arhitektima kompleksa hotela Neboder i Hrvatskog kulturnog doma na Sušaku.

Pod vodstvom Sekcije organizirano je i grupno razgledavanje kompleksa sa završetkom u sobi na 13. katu hotela Neboder. Prvi puta u povijesti javnost je mogla proći kroz zajednička vrata koja spajaju hotel i Hrvatski kulturni dom na Sušaku.

Po završetku razgledavanja gosti su imali priliku vidjeti rezultate trodnevne fotografske radionice pod vodstvom fotografkinje Petre Mrše, u kojoj su sudionici prezentirali svoj pogled na riječke nebodere. Za kraj, u nešto opuštenijem tonu, mladi riječki band Stephany Stefan održao je koncert u klubu hotela Neboder, predstavljajući svoj posljednji album simboličnog naslova „Clouds“.

Plakati, fotografije i izvještaji s radionica prezentirani su na postamentima ispred Gradske vijećnice na Korzu u razdoblju od 17. do 27. listopada 2017., tako da su informacije o festivalu mogli saznati svi stanovnici, oni koji su bili prisutni na događanjima i oni koji nisu.

6. Budućnost projekta i komentar

Festival je izazvao veliki interes građana, a prateći programi bili su kvalitetno posjećeni. Ideja o trodnevnom događanju, provedena kroz različite teme i pristupe, pokazala se ispravnom jer se javnost potakla na razmišljanje i prepoznavanje nebodera kao neotkrivenog potencijala u gradu. Programska raznolikost zainteresirala je ljude različitih dobnih skupina i profesija za temu, što je bio i konačni cilj - privući pažnju svih građana.

Nakon održavanja Festivala nastavila se uspješna suradnja sa stanarima naselja. Zahvaljujući velikom interesu javnosti kreativni kolektiv Kombinat organizirao je događaj „Neboderi kuhaju“, u sklopu kojeg su se prikupljali potpisi pristanka stanara za izvedbu projekta uz degustaciju obroka složenih iz biljaka i voća koje bi stanari mogli sami uzgojiti na svom krovu.

U tijeku je pisanje troškovnika izvedbe i traženje mogućih sponzora i organizacija volonterskih i drugih radova potrebnih da se krovna terasa uredi do ljeta 2018. godine.

Zahvala. *“Ovaj je članak opis rezultata rada u okviru projekta 'NEBODERI - GRAD MEĐU OBLACIMA' koji je sufinanciran od strane Hrvatske komore arhitekata. Projekt su financijski potpomogli i Turistička zajednica Grada Rijeke, Grad Rijeka - Odjel gradske uprave za razvoj, urbanizam, ekologiju i gospodarenje zemljištem, Kreativni kolektiv Kombinat, Hotel Neboder, Društvo arhitekata Rijeka, KD Čistoća, a partneri na projektu su Gradska knjižnica Rijeka, Državni arhiv Grada Rijeke, Muzej Grada Rijeke, Filozofski fakultet u Rijeci, Građevinski fakultet u Rijeci, Galerija Kortil i Dječji vrtić Rastočine. Grafičke priloge nacрта precrtane iz arhivskog materijala izradili su: Mia Bećirević, Ana Lokas, Maria Ljuština, Martina Mataija, Ana Orlić, Anastazija Stjepanović, Mirta Stipeč, Katarina Šantić, Damian Sobol Turina, sve uz pomoć Lidije Butković Mičin, dipl. pov. umj.. Autorice istraživanja konstrukcijske stabilnosti su studentice Građevinskog fakulteta u Rijeci: Ivana Blagdan, Nina Čepić, Simona Gavez i Patricia Jovanović-Verbanac, pod mentorstvom dr. sc. Paula Šćulca, dipl. ing. građ. (“This work is result of work inside the project of “Skyscrapers - city in the clouds” that is financed by Croatian Chamber of Architects, Tourist board of Rijeka, City of Rijeka, Creative collective Kombinat, Hotel Neboder, Association of architects Rijeka, Utility company Čistoća, and the partners are City Library of Rijeka, National*

archive of Rijeka, Museum of Rijeka, Faculty of Philosophy Rijeka, Faculty of Civil Engineering of Rijeka, Gallery Kortil and Kindergarden Rastočine. Graphical drawings are drawn by Mia Bećirević, Ana Lokas, Maria Ljuština, Martina Mataija, Ana Orlić, Anastazija Stjepanović, Mirta Stipeč, Katarina Šantić, Damian Sobol Turina, with help from Lidija Butković Mičin. Authors of structural stability research are civil engineering students Ivana Blagdan, Nina Čepić, Simona Gavez i Patricia Jovanović-Verbanac, under mentorship of Paulo Šćulac”)

Literatura

- [1] Matejčić, R. (2013.) *Kako čitati grad: Rijeka jučer, danas*. Novi Vinodolski, Kvarner.
- [2] Nationalgeographic.com. <https://www.nationalgeographic.com/new-york-city-skyline-tallest-midtown-manchattan/index.html> (15.01.2018.)
- [3] Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljavati u slučaju požara. Narodne novine 29/2013.
- [4] Pravilnik o izmjenama i dopunama pravilnika o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljavati u slučaju požara. Narodne novine 87/2015.
- [5] Škunca, S. (2016.) *Razvojni pristupi urbanističkom planiranju grada Rijeke od 1945. do 1974. godine*. Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet.
- [6] Gašparović, S., Bođić, N. (2005) *Odnos stanara prema životu u visokim stambenim zgradama na primjeru Zagreba*. *Prostor*, 13/2005/1(29), str. 93-105.
- [7] Butković Mičin, L. (2013.) *Ada Felice Rošić i Nada Šilović: Ženski trag u arhitekturi Rijeke*. Katalog izložbe. Zagreb: Kechoffset, d.o.o..
- [8] Neboderi-grad među oblacima (arhiv 'Sekcija'), Gorana Stipeč Brlić, Paulo Šćulac, Mia Bećirević, Ana Lokas, Maria Ljuština, Martina Mataija, Marin Nižić, Ana Orlić, Anastazija Stjepanović, Mirta Stipeč, Katarina Šantić, Damian Sobol Turina, vana Blagdan, Nina Čepić, Simona Gavez , Patricia Jovanović-Verbanac (2017.)

MATRIČNE FAKTORIZACIJE

MATRIX DECOMPOSITION

Ines Radošević Medvidović*, Kristina Pedić*

Sažetak

Matrice se dijele u različite klase, ovisno o formi i određenim svojstvima. Matrične faktorizacije ovise o svojstvima određene klase matrica pa su faktorizacije matrica od velikog značaja u teoriji matrica, pri analizi numeričkih algoritama i uopće u numeričkoj linearnoj algebri. Faktorizacija matrice A je prikaz matrice A kao produkta "jednostavnijih" matrica, što omogućuje jednostavnije rješavanje nekog problema. U teoriji matrica značajne su faktorizacije onih matrica kod kojih je moguća transformacija sličnost, kod što su Schurova dekompozicija, spektralna dekompozicija, singularna dekompozicija. Nadalje, osnovni alat za rješavanje sustava linearnih jednažbi, kao jednog od osnovnih problema numeričke linearne algebre, je LU faktorizacija. Također, bitno je spomenuti i QR faktorizaciju i njeno računanje preko rotacija i reflektora.

Ključne riječi: *numerička analiza, teorija matrica, Jordanova forma, Schurova dekompozicija, LU faktorizacija, QR faktorizacija, singularna dekompozicija*

Abstract

Matrices are divided into different classes, depending on the form and specific properties of the matrix. Matrix factorizations depend on the properties of certain class of matrices, hence matrix factorization are of great importance in the matrix theory, in the analysis of numerical algorithms and even in numerical linear algebra. A factorization of the matrix A is a representation of A as a product of several "simpler" matrices, which makes the problem at hand easier to solve. Factorizations of matrices into some special sorts of matrices with similarity are of fundamental importance in matrix theory, like Schur decomposition, spectral decomposition and the singular value decomposition. Furthermore, the basic tool for solving systems of linear equations, as one of the basic problems of numerical linear algebra, is the LU factorization. Also, it is important to mention QR factorization and its calculation through rotation and reflectors.

* Odjel za matematiku, Sveučilište u Rijeci, Radmile Matejčić 2, Rijeka, Hrvatska
E-mail: inesr@math.uniri.hr; kristina.pedic@student.uniri.hr

Key words: numerical analysis, matrix theory, Jordan canonical form, Schur decomposition, LU decomposition, QR decomposition, singular value decomposition

1. Uvod

Matrična faktorizacija daje prikaz matrice kao produkt matrica, pri čemu odabir faktorizacije ovisi o svojstvu faktorizirane matrice. Dvije su osnovne grupe matričnih faktorizacija, one povezane s rješavanjem sustava linearnih jednadžbi i one povezane s problemom vlastitih vrijednosti. Ovdje će biti opisane neke od njih. Ovaj rad ne sadrži rezultate numeričke linearne algebre korištene u obradi teme, niti su dane definicije i tvrdnje iz teorije matrica, već se smatra da su čitaču poznate. Samo neki pojmovi iz teorije matrica koji se koriste su: trokutasta matrica, dijagonalna matrica, hermitska (simetrična) matrica, unitarna (ortogonalna) matrica, pozitivno definitna matrica, normalna matrica, te pojam vektorske i matrične norme, ranga matrice vidi [8] [11] [19]. Još neki pojmovi koji se koriste i potrebno ih je poznavati za razumijevanje teme su pojam vektora, vektorskog prostora, ortogonalnosti, problem vlastitih vrijednosti i vlastitih vektora (svojtvenih vrijednosti i svojtvenih vektora), algebarske i geometrijske višestrukosti vlastitih vrijednosti, linearnog operatora i matričnog zapisa linearnog operatora, pojam linearne zavisnosti vektora i vezu s dijagonalizibilnosti matrice, [9] [10]. Linearni operator $f: V \rightarrow V$, na vektorskom prostoru V , dopušta dijagonalizaciju ako postoji baza u kojoj je operator reprezentiran dijagonalnom matricom. Dijagonalizibilnost matrice A vezana je za pojam sličnosti, odnosno matrični zapis A operatora f u nekoj bazi vektorskog prostora V . Dijagonalizibilna matrica dopušta rastav $A = SAS^{-1}$, pri čemu je S koordinatna matrica vlastitih vektora operatora f u istoj bazi u kojoj je A njegov matrični zapis, S^{-1} je inverzna matrica od S , a Λ je dijagonalna matrica s vlastitim vrijednostima tog operatora na dijagonali. Naime, dvije kvadratne matrice istog reda n , kao ovdje A i Λ , su slične ako je $A = SAS^{-1}$ za invertibilnu matricu S reda n . Ako je matrica S unitarna, onda je matrica A unitarno dijagonalizibilna (za realnu matricu A kaže se da je ortogonalno dijagonalizibilna). Nadalje, matrice koje nemaju pun sustav vlastitih vektora ne mogu se dijagonalizirati pomoću transformacije sličnosti. Ovo su smjernice za neke matrične faktorizacije koje su vezana za određena svojstva matrica koje želimo faktorizirati.

2. Matrične faktorizacije

2.1. Jordanova forma

Kvadratnu matricu, koja se ne može dijagonalizirati ni nad kojim poljem, pokušava se svesti na oblik koji je onoliko blizak dijagonalnom obliku koliko

matrica dopušta, vidi [8] [10]. Takvu matricu se pokušava kvazidijagonalizirati, odnosno svesti na dijagonalnu blok matricu, sa što je moguće jednostavnijom strukturom blokova. To vodi na pojam Jordanove¹ forme matrice ili Jordanovog normalnog oblika matrice. Elementarna Jordanova klijetka (blok), pridružena skalaru λ je kvadratna matrica oblika

$$J_k(\lambda) = \begin{bmatrix} \lambda & 1 & & \\ & \lambda & \ddots & \\ & & \ddots & 1 \\ & & & \lambda \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{k \times k}. \quad (1)$$

Jordanova klijetka (blok) je dijagonalna blok matrica oblika

$$J(\lambda) = \begin{bmatrix} J_{k_1}(\lambda) & & & \\ & J_{k_2}(\lambda) & & \\ & & \ddots & \\ & & & J_{k_r}(\lambda) \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{l \times l}, \quad (2)$$

pridružena skalaru λ , gdje su $J_{k_r}(\lambda)$ elementarne Jordanove klijetke, iz (1) i pri čemu je $k_1 \geq k_2 \geq \dots \geq k_r \geq 1$ i $k_1 + k_2 + \dots + k_r = l \leq n$. Jordanova matrica

$$J = \begin{bmatrix} J(\lambda_1) & & & \\ & J(\lambda_2) & & \\ & & \ddots & \\ & & & J(\lambda_s) \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{n \times n},$$

je dijagonalna blok matrica gdje su $J(\lambda_j)$ Jordanovi blokovi koji pripadaju različitim skalarima λ_j . Sljedeći teorem je jedan od osnovnih teorema koji daje kanonsku strukturu matrice, određuje Jordanovu formu, formu matrice najbližu dijagonalnoj za matrice koje se ne mogu dijagonalizirati.

Teorem 2.1.1. [9, str.126 -127] Za proizvoljnu matricu $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$ postoji regularna matrica S takva da je

$$A = S \begin{bmatrix} J(\lambda_1) & & & \\ & J(\lambda_2) & & \\ & & \ddots & \\ & & & J(\lambda_p) \end{bmatrix} S^{-1} = SJS^{-1},$$

gdje su $J(\lambda_i)$, $n_i \times n_i$ Jordanovi blokovi međusobno različitih vlastitih vrijednosti $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ od A , s algebarskim kratnostima n_1, \dots, n_p , respektivno, i pritom je $\sum_{i=1}^p n_i = n$.

¹ Camille Jordan (1838. - 1922.), francuski matematičar.

Stupci matrice S su vlastiti vektori, a vrijednosti λ_i za $i = 1, \dots, p$ su vlastite vrijednosti matrice A , pri čemu skup vlastitih vrijednosti od A čini spektar od A . Općenito vijedi da za svaki i postoji vektor $v_i \neq 0$ takav da je $Av_i = \lambda_i v_i$. Vektor v_i naziva se vlastiti vektor matrice A , koji je pridružen vlastitoj vrijednosti λ_i , a broj Jordanovih blokova p predstavlja broj nezavisnih vlastitih vektora matrice A . Matrica A je dijagonalizibilna ako i samo ako je $p = n$, i onda svi stupci matrice S predstavljaju vlastite vektore, a matrica J je dijagonalna jer su joj samo dijagonalni elementi eventualno različiti od nule.

Jordanova matrica J jedinstvena je do permutacije u njezinim dijagonalnim blokovima. Za realnu matricu A s realnim vlastitim vrijednostima, matrica S je realna. Jordanov blok $J(\lambda_i)$ je oblika kao u (2) pa za svako $1 \leq i \leq p$, postoji rastav $n_i = m_{i,1} + \dots + m_{i,r_i}$, pri čemu je $m_{i,j}$ dimenzija j -tog po redu elementarnog Jordanovog bloka u $J(\lambda_i)$. Za $p = 1$, $r_1 = 1$ Jordanov oblik od A je jedan elementaran Jordanov blok reda n . Za $p = n$, $n_i = 1$ za svaki i (pa je $r_i = 1$ i $m_{i,1} = 1$), što znači da je $J(\lambda_i)$ jedan elementarni Jordanov blok. Ovo vodi na zaključak, da je matrica dijagonalizibilna ako su Jordanovi blokovi u Jordanovoj formi matrice reda 1, a ako postoji barem jedan blok reda barem dva, A je defektna matrica. Svojstvo defektnih matrica je da nemaju punu bazu vlastitih vektora, o čemu govori geometrijska kratnost vlastite vrijednosti.

2.2. Schurova dekompozicija

Jedan od osnovnih alata u analiziranju i numeričkom rješavanju problema vlastitih vrijednosti je Schurova dekompozicija. Upravo nam ova dekompozicija daje odgovor na pitanje koliko najviše možemo unitarnom transformacijom sličnosti pojednostaviti matricu $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$. Vlastite vrijednosti i vlastiti vektori matrice A jednostavno se prenose na njoj sličnu matricu $B = S^{-1}AS$, ako je $Bx = \lambda x$, onda je $ASx = \lambda Sx$. Dakle, za računanje vlastitih vrijednosti i vlastitih vektora matrice A praktično je tražiti transformacije sličnosti koje će dati matricu B koja je jednostavnije spektralne strukture. Unitarna (ortogonalna) transformacija sličnosti S ima prednost zbog nekih teoretskih i numeričkih svojstava, kao što je jednostavnije računanje inverza matrice transformacije, budući vrijedi $S^{-1} = S^*$ te ne povećava normu perturbacije, čuva neke klase matrica. Pa ako je A normalna, hermitska, antihermitska, unitarna, onda je matrica B

$(B = S^*AS)$ normalna, hermitska, antihermitska, unitarna, respektivno. Unitarna transformacija sličnosti matrice A dana je u sljedećem teoremu.

Teorem 2.2.1. [9, str.79-80] (*Schurova² dekompozicija*) Neka je $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$ i neka su $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ njene vlastite vrijednosti u proizvoljnom poretku. Postoji unitarna matrica U i gornjetrokutasta matrica T tako da je $U^*AU = T = [t_{ij}]$, pri čemu su dijagonalni elementi $t_{ii} = \lambda_i, i = 1, \dots, n$. Ako je $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ i ako su sve vlastite vrijednosti od A realne, onda je T također realna i može se odabrati U kao realna ortogonalna. Zapis $A = UTU^*$ se naziva Schurova dekompozicija matrice A , a matrica T je Schurova forma od A .

Prema teoremu 2.2.1., svaka kvadratna matrica A je unitarno slična trokutastoj matrici, $A = UTU^*$, čiji su dijagonalni elementi vlastite vrijednosti matrice A u nekom proizvoljnom poretku. Kako slične matrice imaju isti trag, determinantu te svojstvene vrijednosti, Schurov teorem predstavlja vrlo koristan rezultat u teoriji matrica. U dokazu teorema 2.2.1. na matricu A se djeluje unitarnim transformacijama sličnosti sve dok ne postane trokutasta. U tom postupku se direktno koriste vlastite vrijednosti i vlastiti vektori, što zapravo nije praktično jer u primjeni nisu dostupni i nije ih lako izračunati. Numeričko računanje Schurove dekompozicije se svodi na beskonačan niz transformacija sličnosti koje reduciraju elemente ispod glavne dijagonale i osiguravaju trokutastu formu tek u limesu. Schurova forma nije jedinstvena jer se vlastite vrijednosti polazne matrice mogu pojaviti na dijagonali matrice T u bilo kojem poretku.

Primjer 2.2.1. Schurova dekompozicija 2×2 matrice $A = \begin{bmatrix} 5 & 7 \\ -2 & -4 \end{bmatrix}$. Treba pronaći ortogonalnu matricu U i gornjetrokutastu matricu T tako da je $U^T AU = T$, primjenom dokaza teorema Schurove dekompozicije. Iz $\det(A - \lambda I) = 0 \Leftrightarrow \lambda^2 - \lambda - 6 = 0$ slijedi $\lambda_1 = -2$ i $\lambda_2 = 3$. Za vlastitu vrijednost $\lambda_1 = -2$ slijedi

$$(A + 2I)X_1 = 0 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 7 & 7 \\ -2 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow X_1 = (1, -1).$$

Za vlastitu vrijednost $\lambda_2 = 3$ slijedi

$$(A - 3I)X_2 = 0 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 2 & 7 \\ -2 & -7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow X_2 = (7, -2).$$

Ortonormiranjem vektora $X_1 = (1, -1)$ i $X_2 = (7, -2)$ dobiva se ortonormirani skup $\left\{ \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{-1}{\sqrt{2}} \right), \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \right\}$. Slijedi $U = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$. Konačno, Schurova dekompozicija matrice A je

$$T = U^T AU = \begin{bmatrix} -2 & 9 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}.$$

² Issai Schur (1875.-1941.), njemački matematičar.

Matrice koje možda imaju i višestruke vlastite vrijednosti, a mogu se dijagonalizirati, su normalne matrice. Schurov teorem ima neke važne posljedice, kao što je sljedeći korolar koji kaže da je Schurova dekompozicija normalnih matrica dijagonalna. Unitarne i hermitske matrice su klase normalnih matrica pa se sljedeći teorem odnosi i na njih. Unitarno slična matrica normalnoj matrici je opet normalna; za normalnu matricu A i $U^*AU = T$ Schurovu formu, gdje je U neka unitarna matrica, vrijedi

$$T^*T = U^*A^*UU^*AU = U^*A^*AU = U^*AA^*U = U^*AUU^*A^*U = TT^*,$$

pa je T normalna matrica. Za hermitsku matricu A i $U^*AU = T$ Schurovu formu, gdje je U neka unitarna matrica, vrijedi

$$T^* = (U^*AU)^* = U^*A^*U = U^*AU = T,$$

pa je T hermitska matrica. Kako je T gornjetrokutasta matrica, slijedi da je T^* donjetrokutasta matrica, pa je T dijagonalna.

Korolar 2.2.2. Trokutasta matrica T u Schurovoj dekompoziciji $A = UTU^*$ je dijagonalna ako i samo ako je matrica $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$ normalna, što je također ekvivalentno sa $\|A\|_F^2 = \sum_{i=1}^n |\lambda_i(A)|^2$.

Spektralni teoremi slijede iz već spomenute činjenice da Schurova forma, osim što je trokutasta, nasljeđuje svojstva hermitičnosti, antihermitičnosti i unitarnosti. Dakle, normalna matrica A je oblika

$$A = U\Lambda U^*, \tag{3}$$

gdje je Λ dijagonalna matrica, a U unitarna. Zapis matrice A u obliku danom u (3), gdje je $U = [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_n]$ unitarna matrica čiji su stupci vlastiti vektori od A , a Λ dijagonalna matrica s realnim vlastitim vrijednostima od A na glavnoj dijagonali, zove se spektralna dekompozicija³ od A . Mogu se izreći sljedeći *spektralni teoremi* [9, str.101-104]:

Schurova forma hermitske matrice je realna dijagonalna matrica (vrijedi $\bar{\lambda}_i = \lambda_i, i = 1, \dots, n$). Schurova forma antihermitske matrice je dijagonalna matrica s čisto imaginarnim dijagonalnim elementima (vrijedi $\bar{\lambda}_i = -\lambda_i, i = 1, \dots, n$). Schurova forma unitarne matrice je dijagonalna matrica s $|\lambda_j| = 1, j = 1, \dots, n$ (vlastite vrijednosti se nalaze na jediničnoj kružnici).

Za vlastite vrijednosti λ_i pozitivno definitne matrice vrijedi $\mathbf{u}_i^* A \mathbf{u}_i = (A \mathbf{u}_i, \mathbf{u}_i) = (\lambda_i \mathbf{u}_i, \mathbf{u}_i) = \lambda_i \|\mathbf{u}_i\|_2^2 > 0$, gdje je \mathbf{u}_i vlastiti vektor različit od nul-vektora, $\|\mathbf{u}_i\|_2 > 0$, pa mora biti $\lambda_i > 0$ za $i = 1, \dots, n$. Prema tome,

³ EVD je akronim za Eigenvalue decomposition (engl.).

vlastite vrijednosti pozitivno definitne matrice su pozitivne. Analogno, vlastite vrijednosti pozitivno semidefinitne matrice su sve veće ili jednake nuli. Iz svojstva matričnog množenja, za zapis iz (3), često se koristi ekvivalentan zapis

$$\mathbf{A} = \sum_i \lambda_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^*. \quad (4)$$

Zapis iz (4) spektralne dekompozicije koristan je pri računanju inverza, ili općenito n -te potencije matrice \mathbf{A} , pa je $\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda}^{-1} \mathbf{U}^* = \sum_i \frac{1}{\lambda_i} \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^*$ i općenito $\mathbf{A}^n = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda}^n \mathbf{U}^*$. Realna hermitska matrica naziva se simetrična matrica i može se dijagonalizirati pomoću transformacije sličnosti s ortogonalnom matricom pa se njena spektralna dekompozicija zapisuje u obliku $\mathbf{A} = \mathbf{Q} \mathbf{\Lambda} \mathbf{Q}^T$, gdje je $\mathbf{\Lambda}$ dijagonalna matrica vlastitih vrijednosti od \mathbf{A} , a \mathbf{Q} ortogonalna matrica čiji su stupci vlastiti vektori od \mathbf{A} .

2.3. LU faktorizacija

Rješavanje linearnih sustava jednadžbi $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ jedan je od osnovnih problema numeričke linearne algebre. Matrica $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_{ij}]_{i,j=1}^n \in \mathbb{R}^{n \times n}$ je matrica sustava, a njeni elementi su koeficijenti uz nepoznanice, vektor $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_i]_{i=1}^n \in \mathbb{R}^n$ je vektor nepoznanica i vektor $\mathbf{b} = [\mathbf{b}_i]_{i=1}^n \in \mathbb{R}^n$ je vektor desne strane sustava, elementi su mu slobodni koeficijenti. Rješenje sustava dobiva se množenjem jednadžbe $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ s lijeve strane matricom \mathbf{A}^{-1} , $\mathbf{A}^{-1} \mathbf{Ax} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b} \Rightarrow \mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b}$. Takav način rješavanja ne koristi se često jer dovodi do problema traženja inverza i množenja matrica i vektora. Najpoznatiji i najjednostavniji algoritam za rješavanje sustava linearnih jednadžbi je svođenje sustava na njemu ekvivalentan sustav koristeći *Gaussovu⁴ metodu eliminacije*, vidi [5] [8]. Proces eliminacije interpretira se kao faktorizacija matrice sustava \mathbf{A} na produkt trokutastih matrica. Trokutasta faktorizacija iz sljedećeg teorema osnova je spomenute metode.

Teorem 2.3.1. [8, str.150] (*LU faktorizacija*). Neka je matrica $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{n \times n}$. Onda postoji matrica permutacije \mathbf{P} takva da Gaussove eliminacije daju *LU* faktorizaciju

$$\mathbf{PA} = \mathbf{LU}, \quad (5)$$

matrice \mathbf{PA} , pri čemu je matrica \mathbf{L} donjetrokutasta s jedinicama na dijagonali, a \mathbf{U} gornjetrokutasta matrica.

Faktorizacija oblika kao u (5) je *LU faktorizacija s parcijalnim pivotiranjem*, gdje je \mathbf{P} matrica permutacije ili permutacija koja permutira retke matrice

⁴ Johann Carl Friedrich Gauß, lat. Carolus Fridericus Gauss, (1777.-1855.), njemački matematičar.

A da bi se osigurala faktorizacija. Naime, izvedivost Gaussovih eliminacija koje dovode do faktorizacije ovisi o uvjetu da su pivotni elementi različiti od nule, što je vidljivo iz algoritma 2.3.2., a ti uvjeti su osigurani ako su matrice A determinante glavnih podmatrica $A(1:k, 1:k)$, $k = 1, \dots, n-1$, različite od nule. Ako je $A = LU$ faktorizacija matrice A , pri čemu je matrica L donjetrokutasta s jedinicama na dijagonali, a U gornjetrokutasta matrica, onda se sustava jednadžbi $Ax = LUx = b$ rješava upravo kao dva jednostavna linearna sustava. Neka je $Ly = b$ donjetrokutasti sustav i $Ux = y$ gornjetrokutasti sustav. Faktorizacija matrice A označava se sa PA kao u (5), gdje je P matrica permutacije koja u svakom retku i svakom stupcu ima točno jednu jedinicu. Na samom početku ona je jednaka jediničnoj matrici. Dakle, sustav $Ax = b$ se rješava pomoću LU faktorizacije tako da se pomnoži s matricom permutacije P čime se dobiva $P Ax = LUx = Pb$. Vektor $b' = Pb$ je vektor koji ima permutirane komponente vektora b . Postupak se nastavlja s $LUx = b'$.

Primjer 2.3.1. Rješenje sustava linearnih jednadžbi Gaussovom metodom s parcijalnim pivotiranjem

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 + x_3 &= 4 \\ x_1 + 2x_2 + 3x_3 &= 5 \\ 5x_1 + 3x_2 + 5x_3 &= 14 \end{aligned}$$

Najveći element u prvom stupcu matrice sustave $A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 \\ 5 & 3 & 5 \end{bmatrix}$ je na

poziciji (3,1) pa zamjenom prvog i trećeg redka maksimizira se prvi pivotni element. Zamjena redaka u matrici biti će provedena djelovanjem matrice

permutacija $P^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $P^{(1)}A = \begin{bmatrix} 5 & 3 & 5 \\ 1 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$. Sada se definira $L^{(1)} =$

$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{5} & 1 & 0 \\ -\frac{1}{5} & 0 & 1 \end{bmatrix}$, pa je $A^{(1)} = L^{(1)}P^{(1)}A = \begin{bmatrix} 5 & 3 & 5 \\ 0 & \frac{7}{5} & 2 \\ 0 & \frac{2}{5} & 0 \end{bmatrix}$. Sljedeći pivotni element

je maksimiziran identičnom transformacijom $P^{(2)} = I$. Definira se $L^{(2)} =$

$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{2}{7} & 1 \end{bmatrix}$, pa je $A^{(2)} = L^{(2)}P^{(2)}A^{(1)} = L^{(2)}IA^{(1)} = \begin{bmatrix} 5 & 3 & 5 \\ 0 & \frac{7}{5} & 2 \\ 0 & 0 & -\frac{4}{7} \end{bmatrix}$.

Sada slijedi $U \equiv A^{(2)} = L^{(2)}P^{(2)}L^{(1)}P^{(1)}A = L^{(2)}IL^{(1)}P^{(1)}A$. Dakle, $P^{(1)}A =$

$$PA = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 \\ 5 & 3 & 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 3 & 5 \\ 1 & 2 & 3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = L^{(1)-1}L^{(2)-1}U. \text{ Dobivena je}$$

$$\text{faktorizacija } PA = LU = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{5} & 1 & 0 \\ \frac{1}{5} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{2}{7} & 1 \end{bmatrix} U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{5} & 1 & 0 \\ \frac{1}{5} & \frac{2}{7} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 & 3 & 5 \\ 0 & \frac{7}{5} & 2 \\ 0 & 0 & -\frac{4}{7} \end{bmatrix}$$

matrice PA na dvije trokutaste matrice. Iz matrične jednadžbe $PAx =$

$$LUx = Pb \text{ i s maticom permutacije } P = P^{(2)}P^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ dobiva se}$$

$$\text{vektor } b' = Pb = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 \\ 5 \\ 14 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 14 \\ 5 \\ 4 \end{bmatrix}. \text{ Sada zadani linearni sustav ima}$$

$$\text{oblik } \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{5} & 1 & 0 \\ \frac{1}{5} & \frac{2}{7} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 & 3 & 5 \\ 0 & \frac{7}{5} & 2 \\ 0 & 0 & -\frac{4}{7} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 14 \\ 5 \\ 4 \end{bmatrix}. \text{ Rješavanjem sustava } Ly = b', \text{ s}$$

$$\text{donjetrokutastom matricom, dobiva se } \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 14 \\ \frac{11}{5} \\ \frac{4}{7} \end{bmatrix}, \text{ te rješavanjem}$$

$$\text{sustava } Ux = y, \text{ s gornjetrokutastom matricom, dobiva se } \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ -1 \end{bmatrix}.$$

Za faktorizaciju nekih matrica, matrica P nije potrebna pa se oblik iz relacije (5), gdje je P sada identiteta, svodi na oblik $A = LU$. Primjer takvih matrica su pozitivno definitne matrice, kod kojih zbog hermitičnosti vrijedi da ako L i U^* imaju iste dijagonalne elemente, onda je $U = L^*$, pa LU faktorizacija pozitivno definitne matrice ima oblik $A = LL^* = U^*U$ koji se naziva **faktorizacija Choleskog**⁵ ili **trokutasta faktorizacija simetrične pozitivno definitne matrice**, vidi [2, str. 46]. Ako faktorizacija $A = LU$ postoji i ako je matrica A regularna, onda je faktorizacija jedinstvena, postoji točno jedna donjetrokutasta matrica L s jedinicama na dijagonali i točno jedna gornjetrokutasta matrica U . Onda vrijedi i $\det(A) = \prod_{i=1}^n u_{ii}$.

⁵ André-Louis Cholesky (1875.-1918.), francuski matematičar.

Algoritam 2.3.2. [7, str.169] (*Računanje LU faktorizacije matrice A*)

$$L = I;$$

za $k = 1, \dots, n - 1;$

za $j = k + 1, \dots, n;$

$$l_{jk} = \frac{a_{jk}^{(k-1)}}{a_{kk}^{(k-1)}};$$

$$a_{jk}^{(k)} = 0;$$

za $j = k + 1, \dots, n;$

za $i = k + 1, \dots, n;$

$$a_{ij}^{(k)} = a_{ij}^{(k-1)} - l_{ik} a_{kj}^{(k-1)};$$

$$U = A^{(n-1)} = \left[a_{ij}^{(n-1)} \right].$$

2.4. QR faktorizacija

Neka je zadan skup linearno nezavisnih vektora $a_1, a_2, \dots, a_n \in \mathbb{R}^m(\mathbb{C}^m)$, smještenih u stupce matrice A dimenzije $m \times n$. Za linearno nezavisan skup vektora nužno je $m \geq n$. Slijedi teorem koji daje još jednu metodu za rješavanje linearnih sustava i problema najmanjih kvadrata, vidi [6] [8].

Teorem 2.4.1. [9, str.112] (*QR faktorizacija*) Neka je $A \in \mathbb{C}^{m \times n}$, $m \geq n$. Onda postoji matrica $Q \in \mathbb{C}^{m \times n}$, s ortonormiranim stupcima i gornjetrokutasta matrica $R \in \mathbb{C}^{n \times n}$ tako da je

$$A = QR. \tag{6}$$

Svaka matrica $A \in \mathbb{C}^{m \times n}$ ($A \in \mathbb{R}^{m \times n}$), $m \geq n$, ima QR faktorizaciju, a ako je i punog ranga onda ima jedinstvenu QR faktorizaciju. Najjednostavniji dokaz ovog teorema je korištenjem Gram⁶-Schmidtovog⁷ postupka ortogonalizacije, vidi algoritam [8, str.218] [13]. Primjenom Gram-Schmidtovog postupka ortogonalizacije, vidi [1] [8], na stupce matrice A dobivaju se jedinstvene matrice Q i R , pri čemu matrica Q ima ortonormirane stupce, a matrica R je gornjetrokutasta s pozitivnim dijagonalnim elementima. Gram-Schmidtovim postupkom ortogonalizacije konstruira se ortonormirani skup vektora $q_1, q_2, \dots, q_n \in \mathbb{R}^m(\mathbb{C}^m)$ koji razapinju isti potprostor u $\mathbb{R}^m(\mathbb{C}^m)$. Neka je $r_{ij} = q_i \cdot a_j$ za $i \leq j$, oznaka za skalarni produkt vektora. Slijedi postupak u kojem se polazni stupac a_j izražava kao linearna kombinaciju prvih j vektora q_i ortonormirane baze

⁶ Jorgen Pedersen Gram (1850.-1916.), danski matematičar.

⁷ Erhard Schmidt (1876.-1959.), njemački matematičar.

$$\begin{aligned}
 a_1 &= r_{11}q_1, \\
 a_2 &= r_{12}q_1 + r_{22}q_2, \\
 a_3 &= r_{13}q_1 + r_{23}q_2 + r_{33}q_3, \\
 &\dots \\
 a_n &= r_{1n}q_1 + r_{2n}q_2 + \dots + r_{nn}q_n.
 \end{aligned}$$

Postupak se može zapisati u obliku umnoška matrica

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{m1} & q_{m2} & \dots & q_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ 0 & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & r_{nn} \end{bmatrix}$$

gdje je $(a_{kj})_{k=1}^m = a_j$ i $(q_{kj})_{k=1}^m = q_j$. Elementi r_{ij} su elementi matrice R i jasno je da se može uzeti $r_{ii} > 0$. Ovim je dobivena faktorizacija matrice A dimenzije $m \times n$, $m \geq n$, kao u teoremu 2.4.1., i naziva se reducirana QR faktorizacija matrice A . Može se izreći i druga varijanta iste faktorizacije, koja se dobiva iz reducirane i naziva se potpuna QR faktorizacija matrice A . Matrici Q dodaje se $m - n$ dodatnih otronormiranih stupaca, tako da se dobije $\hat{Q} \in \mathbb{C}^{m \times m}$ unitarna matrica, odnosno ortogonalna u realnom slučaju, onda je $A = \hat{Q}\hat{R}$, gdje je $\hat{R} \in \mathbb{C}^{m \times n}$ matrica kojoj je gornji $n \times n$ blok jednak matrici R , a ostatak jednak nuli, $A = \hat{Q}\hat{R} = \begin{bmatrix} Q & Q_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix}$.

Iako je ovaj dokaz ortogonalizacijom elegantan, u praksi se nikada ne koristi jer je nestabilan kad su stupci od A skoro linearno zavisni. Umjesto toga, može se koristiti modificirani Gram-Schmidov postupak ortogonalizacije, dan algoritmom u [8, str.218] [13], koji je stabilniji, ali i kod njega se može dogoditi da je izračunati Q daleko od ortogonalne matrice.

Postoji više načina računanja QR faktorizacije, vidi [5], od kojih su najčešće korištena ona dva načina kod kojih se ortogonalna matrica Q dobiva uzastopnim množenjem elementarnih ortogonalnih matrica. Dakle, primjenom niza unitarnih matrica na matricu A , kako bi se transformirala na gornjetrokutastu formu, dat će QR faktorizaciju matrice A , kao u (6). Budući da je produkt unitarnih matrica unitaran i inverz unitarne matrice također unitarna matrica. U tom postupku koriste se ili Givensove rotacije ili Householderovi reflektori kojima se poništavaju odgovarajući elementi u matrici A . Spomenuti postupci za računanje QR faktorizacije ovdje neće biti opisani, no lako ih je pronaći u literaturi iz numeričke analize, vidi [8] [13].

2.5. Dekompozicija na singularne vrijednosti

Singularna dekompozicija je temeljna dekompozicija u teoriji matrica i primjenama matrica u numeričkoj linearnoj algebrama. Ima velike primjene u znanosti, tehnici, ekonomiji te u raznim praktičnim problemima, što je čini vjerojatno najvažnijom matricnom dekompozicijom. Dvije su grupe metoda za računanje singularne dekompozicije općih matrica. Metode koje se temelje na bidijagonalizaciji polazne matrice, kao što su QR, DQD (differential qd) i DC (divide i conquer) metode te metode koje se temelje na dijagonalizaciji polazne matrice, vidi [5], [18]. Računanje po bidijagonalizacijskim metodama je brže, ali je nezadovoljavajuće točnosti. Iz navedenog razloga sve je veći interes za dijagonalizacijskim metodama. Iterativne metode za računanje vlastitih vrijednosti i vlastitih vektora, vidi [14] te singularnih vrijednosti i vektora zadane matrice, temeljene na nizu ravninskih unitarnih transformacija sličnosti biranih tako da se izvandijagonalni dio matrice maksimalno reducira, nazivaju se Jacobijeve metode, vidi [8] [15], i pripadaju klasi dijagonalizacijskih metoda.

Faktorizacija matrice A prikazana produktom $U\Sigma V^*$, gdje su U i V unitarne matrice, a Σ dijagonalna matrica, naziva se singularna dekompozicija matrice A ili kraće SVD⁸ matrice A . SVD je temeljna dekompozicija u teoriji matrica i primjenama matrica u numeričkoj linearnoj algebri. Singularna dekompozicija matrice opisana je teoremom koji slijedi, čime su definirane singularne vrijednosti i singularni vektori matrice koja se promatra.

Teorem 2.5.1. [10, str. 144] (*Singularna dekompozicija matrice*) Ako je $A \in \mathbb{C}^{m \times n}$, onda postoje unitarne matrice $U \in \mathbb{C}^{m \times m}$ i $V \in \mathbb{C}^{n \times n}$, takve da je

$$U^*AV = \Sigma, \quad \Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{\min\{m,n\}}),$$

pri čemu vrijedi $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_{\min\{m,n\}} \geq 0$.

Brojevi $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{\min\{m,n\}}$ ⁹ su singularne vrijednosti matrice A . Stupci matrice U su lijevi, a stupci matrice V su desni singularni vektori matrice A .

Primjer 2.5.1. Singularna dekompozicija 3×2 matrice A je (u Matlabu)

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 3 \\ 3 & 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.3381 & 0.8480 & 0.4082 \\ -0.5506 & 0.1735 & -0.8165 \\ -0.7632 & -0.5009 & 0.4082 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6.5468 & 0 \\ 0 & 0.3742 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.5696 & -0.8219 \\ -0.8219 & 0.5696 \end{bmatrix}$$

Singularne vrijednosti su unitarno invarijantne, jer ako je $A = U\Sigma V^*$ singularna dekompozicija matrice A , onda je za proizvoljne unitarne

⁸ SVD je akronim za Singular Value Decomposition (engl.).

⁹ Matrica A ima $r(A)$ ne-nul singularnih vrijednosti i $\min\{m, n\} - r(A)$ nula singularnih vrijednosti

matrice $W_1 \in \mathbb{C}^{m \times m}$ i $W_2 \in \mathbb{C}^{n \times n}$, $W_1 A W_2 = (W_1 U) \Sigma$ pa je to singularna dekompozicija matrice $W_1 A W_2$. Dakle, A i $W_1 C A$ matrice imaju iste singularne vrijednosti.

Može se pokazati da su singularne vrijednosti, σ_i , $1 \leq i \leq \min\{m, n\}$, matrice A kvadratni korijeni vlastitih vrijednosti matrica $A^* A$ i AA^* , [12]. Za $A \in \mathbb{C}^{m \times n}$ obje matrice $A^* A$ i AA^* su hermitske i pozitivno semidefinitne pa su njihove vlastite vrijednosti nenegativne.

Teorem 2.5.2. [4, str. 555] Neka je $A = U \Sigma V^*$ singularna dekompozicija matrice $A \in \mathbb{C}^{m \times n}$ ranga r . Onda je

$$(i) \quad V^*(A^*A)V = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_r^2, \underbrace{0, \dots, 0}_{n-r});$$

pa su kvadrati singularnih vrijednosti matrice A vlastite vrijednosti od $A^* A$ s dodatnih $n - r$ nula vlastitih vrijednosti. Stupci matrice V su odgovarajući vlastiti vektori.

$$(ii) \quad U^*(AA^*)U = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_r^2, \underbrace{0, \dots, 0}_{m-r});$$

pa su kvadrati singularnih vrijednosti matrice A vlastite vrijednosti od AA^* s dodatnih $m - r$ nula vlastitih vrijednosti. Stupci matrice U su odgovarajući vlastiti vektori.

Prema definiciji singularnih vrijednosti i uzimajući za matricu A normalnu matricu, može se zaključiti da su singularne vrijednosti normalne matrice apsolutne vrijednosti njezinih vlastitih vrijednosti.

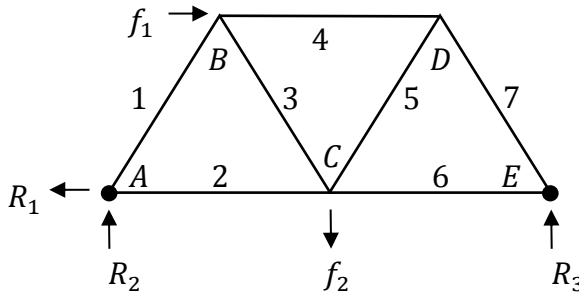
Korolar 2.5.3. Neka je $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$ normalna matrica s vlastitim vrijednostima $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. Singularne vrijednosti od A su $|\lambda_i|$, $i = 1, \dots, n$.

SVD postoji za proizvoljne matrice i jedna je od najčešće korištenih alata za rješavanje niza problema u teoriji matrica, vidi [3], [10]. U singularnoj dekompoziciji pojavljuju se unitarne matrice, što je čini izvrsnim sredstvom za diskutiranje geometrije unitarnih prostora, pomoću nje se lako izračuna rang matrice te aproksimira matricom manjeg ranga i jednostavno se izračunava generalizirani inverz matrice A . Moguće je proširiti pojam inverza matrice na matrice koje nisu regularne ili čak nisu niti kvadratne. Slijedi jedan od načina definiranja generaliziranog inverza.

SVD daje jednostavnu geometrijsku interpretaciju transformacije $x \mapsto Ax = U \Sigma V^* x$. Množenje unitarnim matricama V^* i U ne mijenja normu vektora, njihov geometrijski smisao je rotacija. Vektor x se rotira u vektor $V^* x$, zatim se njegove komponente pomnože s nenegativnim brojevima σ_i , što znači da se mijenja njihova duljina, te se dobije vektor $\Sigma V^* x$. Na kraju vektor $\Sigma V^* x$ se rotira matricom U . Norma vektora Ax ovisi o singularnim vrijednostima matrice A .

2.6. Matrice faktorizacije u inženjerskim problemima

Prikazane matrice faktorizacije u radu nalaze primjenu u svim granama tehnike, kao u tehničkoj mehanici, statici i dinamici konstrukcija, potresnom inženjerstvu, hidromehanici, mehanici fluida, ispitivanju materijala i konstrukcija, vidi [21]. U rješavanju inženjerskih problema često se pojavljuju sustavi linearnih jednadžbi $Ax = b$. Konkretno, u svrhu ocjene stanja i ponašanja neke konstrukcije, konstrukcija se ispituje prema različitim shemama opterećenja, kao što je to dano primjerom rešetkastog nosača na Slici 1.



Slika 1. Shema opterećenja konstrukcije.

Na prikazanom primjeru čvorovi su označeni slovima A, B, \dots , štapni elementi sa $1, 2, \dots$, reakcije oslonaca sa R_1, R_2, R_3 , a sa f_1 i f_2 aplicirane sile u čvorovima za različite sheme opterećenja. Prikazana rešetka sastoji se od jednakostraničnih trokuta. Ukoliko na rešetkastom nosaču primijenimo metodu čvorova, vidi [22], za iznalaženje nepoznatih veličina (u našem slučaju sila u štapnim elementima), moguće je ispisati jednadžbe ravnoteže za svaki čvor. Računanje nepoznanica svodi se na rješavanje sustava linearnih jednadžbi, odnosno za naš navedeni primjer potrebno je riješiti sustav sedam jednadžbi sa sedam nepoznanica. Opterećenja u različitim čvorovima možemo prikazati vektorom b . Ovisno o broju nepoznanica, odnosno o veličini matrice A , možemo primijeniti različite metode za rješavanje. Najjednostavnija metoda za rješavanje sustava linearnih jednadžbi je Gaussova metoda eliminacije koja se interpretira kao faktorizacija matrice sustava A na produkt trokutastih matrica. Pomoću računala moguće je brzo i točno riješiti sve veće i veće sustave što inženjerima omogućuje rješavanje sve složenijih problema. U primjeru sa Slike 1., opterećenja u različitim čvorovima daju različite vektore b u sustavu linearnih jednadžbi $Ax = b$, s istom matricom sustava A . Za slučaj velike matrice A te kako bi se smanjilo vrijeme računanja i izbjeglo ponavljanje koraka Gaussove eliminacije na matrici A , pri rješavanju sustava za svaki različiti vektor b , moguće je napraviti LU faktorizaciju matrice A . Također, ranije u radu, opisani problem vlastitih vrijednosti i

spektralna dekompozicija nalaze praktičnu primjenu u dinamici konstrukcija, posebice u slučajevima iznalaženja odziva konstrukcije izložene slučajnim procesima. Primjer može biti ponašanje više etažne zgrade u slučaju djelovanja potresa. U tom slučaju rješavanje problema svodi se na modalnu seizmičku analizu, odnosno dinamičku analizu linearnih sustava sa n stupnjeva slobode zasnovanoj na metodi razvijanja po vlastitim oblicima, ili kako se još naziva analizi po tonovima ili modalnoj analizi, vidi [20]. Nadalje, tipičan inženjerski primjer je vibriranje konzole kojoj je dana početna defleksija i potom je puštena da slobodno vibrira. Njezino vibriranje je problem vlastitih vrijednosti, gdje su vlastite vrijednosti prirodne frekvencije konzolne grede, a vlastiti vektori njeni modalni oblici.

3. Zaključak

Ovaj rad daje pregled samo nekih matričnih faktorizacija, onih koje se često primjenjuju. Osnovna ideja rastava ili faktorizacije matrice je njen zapis kao produkt jednostavnijih matrica čime se ubrzava rješavanje raznih problema kao što su problemi određivanja vlastitih vrijednosti, rješavanja sustava linearnih jednadžbi i rješavanja linearnog problema najmanjih kvadrata. Osvrt na bilo koju od faktorizacija ostavlja dojam jednostavnosti, no samo jednostavnosti u teoriji, ne i u računanju, a naročito ne u računanju matrica većih dimenzija. Primjerice, sustava linearnih jednadžbi oblika $Ax = b$, pri čemu je A kvadratna $n \times n$ regularna matrica, a b n -dimenzionalni vektor, naoko je jednostavan za rješavanje, naročito za mali broj jednadžbi i nepoznanica. Sustavi linearnih jednadžbi imaju široku primjenu, a to su obrada digitalnih signala, aproksimacija nelinearnih problema u numeričkoj matematici i različite procjene i predviđanja, u fizici, kemiji, računarstvu i ekonomiji. Primjerice, LU faktorizacija i QR faktorizacija naročito su korisne u slučajevima kad se rješava više sustava linearnih jednadžbi s istom matricom A . Rješavanje sustava ipak krije mnoge zamke iako nam za njihovo rješavanje stoje na raspolaganju moćna računala. Može se samo spomenuti neke od problema, kao što je problem točnosti ulaznih podataka, problem smještanja podataka u računalo, dakle memorijskog prostora, broj operacija vezanih za odabranu metodu računanja, te aritmetika računala i točnost izlaznih podataka. Za rješavanje spomenutog sustava razvijaju se brojne iterativne metode, vidi [2], kod kojih se iteriranjem pokušava poboljšati neka početna aproksimacija, tako da u svakoj iteraciji greška bude što manja. Nadalje, primjenom odgovarajućeg kriterija zaustavljanja nekog iterativnog procesa postiže se dovoljno dobra aproksimacija za traženi vektor. Jordanova forma i Schurova dekompozicija daju bitne informacije o matrici koje se često koriste kod analize numeričkih algoritama. Schurova dekompozicija korisna je u

numeričkom računanju jer unitarnom sličnošću matricu prevode u jednostavniji oblik. Ovaj rad nije posvećen numeričkom testiranju iteracija spomenutih metoda, vidi [4], [12], [17], već daje pregled matričnih faktorizacija i mogućnosti izračunavanja traženih podataka, ovisno o klasi matrica, njihovoj formi i određenim svojstvima.

Literatura

- [1] Atkinson, K.E. , *An Introduction to Numerical Analysis*, John Wiley and Sons, New York, 1989.
- [2] Björck, W., Dahlquist, G, *Numerical Mathematics and Scientific Computation*, SIAM, Philadelphia, 1999.
- [3] Bosner, N., Fast Methods for Large Scale Singular Value Decomposition, Doktorski rad, Matematički odjel PMF-a, Zagreb, 2008.
- [4] Datta, B.N., *Numerical Linear Algebra and Applications*, SIAM, Philadelphia, 2010.
- [5] Demmel, J.W., *Applied Numerical Linear Algebra*, SIAM, Philadelphia, 1997.
- [6] Drmač, Z., *Numerička analiza I - predavanja*, Matematički odjel PMF-a, Zagreb, 2008.
- [7] Drmač, Z., Hari, V., Marušić, M., Rogina, M., Singer, S., Singer, S., *Numerička analiza*, Matematički odjel PMF-a, Zagreb, 2003.
- [8] Golub, G.H., Van Loan, C.F., *Matrix Computations*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore-London, 1993.
- [9] Horn, R.A., Johnson, C.R., *Matrix Analysis*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- [10] Horn, R.A., Johnson, C.R., *Topics in Matrix Analysis*, Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
- [11] Horvatić, K., *Linearna algebra*, Matematički odjel PMF-a, Zagreb, 1995.
- [12] Moler, C.B., *Numerical Computing with MATLAB*, SIAM, Philadelphia, 2004.
- [13] Rogina, M., Singer, S., Singer, S., *Numerička matematika - predavanja*, Matematički odjel PMF-a, Zagreb, 2008.
- [14] Parlett, B.N., *The Symmetric Eigenvalue Problem*, SIAM, Philadelphia, 1998.
- [15] Radošević, I., Jacobijeve metode za računanje singularne dekompozicije matrice, Ur. Arbanas, Ž., Zbornik radova KNJIGA XVII , 247-269, Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2014.
- [16] Stoer, J., Bulirsch, R., *Introduction to Numerical Analysis*, Springer-Verlag, New York, 2002.
- [17] Strang, G., *Linear Algebra and It's Applications*, Thomson, Belmont, 2006.
- [18] Trefethen, L.N., Bau, D., *Numerical Linear Algebra*, SIAM, Philadelphia, 1997.
- [19] Zhang, F., *Matrix Theory*, Springer-Verlag, New York, 1999.
- [20] Čaušević, M., Dinamika konstrukcija – diskretni sustavi, ŠK, Zagreb, 2005.
- [21] Kreyszig, E., *Advanced Engineering Mathematics*, 9th edition, John Wiley and Sons, New York, 2006.
- [22] Simović, V., Građevinska statika I, Građevinski institut, Zagreb, 1988.

FAKULTETSKI GODIŠNJAK

Studenti koji su diplomirali

Preddiplomski stručni studij

Romano Baćac
Karlo Belavić
Ana Berljafa
Marko Bulić
Matea Demark
Luka Đorđević
Darvin Grubišić
Josip Ilić
Viktoria Kauzlarić
Filip Kosec
Marino Krajačić
Lucija Maksan
Matea Mičetić
Marko Milošević
Mario Mohorovičić
Luka Peričić
Edin Redžović
Edita Štefanini
Kristian Šušberić
Marko Veselčić
Vladimir Vidas

Preddiplomski sveučilišni studij

Luka Andrić
Ivan Antulov-Fantulin
Mateja Babok
Patrik Banko
Ema Blažina
Iva Blažina
Valentin Blečić
Ante Borovina
Maja Bosić

Ivan Budimir
Sara Čiča
Nina Čepić
Aleksandra Daić
Nika Đurić
Jurica Grgurić
Martina Gulić
Grga Hobar
Martina Jelenić
Patricia Jovanović-Verbanac
Ivan Juraga
Anel Karabegović
Simona Kaselj
Ivan Kišić
Ivan Klasić
Robert Kocijan
Izabela Krnjus
Marina Macan
Alen Malagić
Marko Marinić
Martina Mikulić
Lea Miletić
Filip Milković
Marina Miškulin
Ana Mužić
Tomi Nemčić
Katarina Oštrić
Mauro Pamić
Antonela Pereša
Dean Perožić
Dalibor Pervan
Krešimir Peša
Anđela Rabar

Iva Radetić
 Mateo Rešetar
 Tea Rojnić
 Tomislav Rončević
 Ivan Rutko
 Ivan Stanić
 Matea Stanić
 Dorotea Starčević
 Bruno Stemberger
 Mia Šimičić
 Maja Šišović
 Sara Škunca
 Sandra Štajdohar
 Viktor Turina
 Ivana Zoričić
 Marino Žuža

Diplomski sveučilišni studij, smjerovi

Anja Grgurica, Geotehnika -
 Hidrotehnika
 Ivan Banić, Hidrotehnika
 Matija Bistričić, Hidrotehnika
 Antonio Bogdan, Hidrotehnika
 Karla Bratović, Hidrotehnika
 Daniel Brusić, Hidrotehnika
 Marija Cindrić, Hidrotehnika
 Martina Fabić, Hidrotehnika
 Nina Garić, Hidrotehnika
 Sandro Grbac, Hidrotehnika
 Barbara Jugović, Hidrotehnika
 Gabrijela Kablar, Hidrotehnika
 Sara Kuzma, Hidrotehnika
 Leo Malnar, Hidrotehnika
 Ivan Pavić, Hidrotehnika
 Ivan Pejić, Hidrotehnika
 Matija Perić, Hidrotehnika
 Petra Prenc, Hidrotehnika

Ivan Ušić, Hidrotehnika
 Matej Viduka, Hidrotehnika
 Lena Vozila, Hidrotehnika
 Luka Zaharija, Hidrotehnika
 Manuela Andrić, Konstrukcije
 Sandra Baltić, Konstrukcije
 Anton Bogdanić, Konstrukcije
 Simona Dobrilla, Konstrukcije
 Filip Franolić, Konstrukcije
 Toni Komadina, Konstrukcije
 Karlo Kraš, Konstrukcije
 Ana Licul, Konstrukcije
 Mate Marušić, Konstrukcije
 Ivana Rakić, Konstrukcije
 Valentino Simčić, Konstrukcije
 Andrea Škarić, Konstrukcije
 Izabela Šutić, Konstrukcije
 Andrej Vorkapić, Konstrukcije
 Ivan Vretenar, Konstrukcije
 Albert Zahtila, Konstrukcije
 Daniel Zgrablić, Konstrukcije
 Laura Žiković, Konstrukcije
 Ivana Nekoksa, Konstrukcije -
 Geotehnika
 Ivana Glavić, Urbano
 inženjerstvo
 Kristijan Gregov, Urbano
 inženjerstvo
 Krešimir Jaredić, Urbano
 inženjerstvo
 Nika Krajnović, Urbano
 inženjerstvo
 Dolores Marković, Urbano
 inženjerstvo
 Stjepan Marušić, Urbano
 inženjerstvo
 Marko Mladen, Urbano
 inženjerstvo

Nikola Oroz, Urbano
inženjerstvo
Gabrijel Peroli, Urbano
inženjerstvo
Gorana Staničić, Urbano
inženjerstvo
Jana Vehovec, Urbano
inženjerstvo
Dario Vuljanić, Urbano
inženjerstvo

**Specijalistički diplomski
stručni studij**

Ivica Filipović
Jure Lisak
Sanjin Paulović
Ivan Pičuljan

pripremila Anđela Horvat

Obranjeni doktorski radovi

Dr. sc. Ivana Sušanj, mag. ing. aedif.

Katedra za hidrotehniku /
Zavod za hidrotehniku i geotehniku

isusanj@uniri.hr

<https://portal.uniri.hr/portfelj/1077>



Mentorica / komentorica:

prof. dr. sc. Nevenka Ožanić / prof. dr. sc. Barbara Karleuša

Naslov doktorskog rada:

Razvoj hidrološkog modela otjecanja s malih slivova temeljen na umjetnoj neuronskoj mreži (Development of Hydrological Rainfall-Runoff Model Based on Artificial Neural Network in Small Catchments)

Dr. sc. Ivana Sušanj je 2009. godine diplomirala na Hidrotehničkom smjeru Građevinskog fakulteta u Rijeci. Poslijediplomski doktorski studij Građevinskog fakulteta u Rijeci upisala je 2011. (smjer Hidrotehnika priobalnih područja), a doktorski rad obranila dana 13. siječnja 2017. godine.

Doktorski rad proizašao je iz motivacije za istraživanjem mogućnosti predviđanja štetnih pojava kao što su bujice, muljni tokovi te debratne poplave na malim slivovima, u cilju implementacije sustava za rano uzbunjivanje. Istraživanja unutar rada obuhvaćaju uspostavu kontinuiranog mjerenja meteoroloških i hidroloških podataka na istražnom području sliva Slani potok (Vinodolska dolina), primjenu umjetnih neuronskih mreža pri razvoju hidrološkog modela predviđanja otjecanja, određivanje načina validacije i evalvacije modela te razvoj metodologije implementacije hidrološkog modela predviđanja otjecanja na malim slivovima.

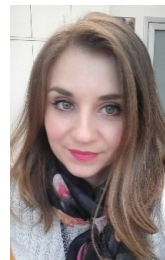
Područja znanstveno – istraživačkog interesa vezana su uz istraživanja hidroloških procesa otjecanja primjenom umjetnih neuronskih mreža na male slivove, statističku analizu i obradu podataka mjerenja, regulaciju i revitalizaciju vodotoka.

Dr. sc. Paulina Krolo, mag. ing. aedif.

Katedra za nosive konstrukcije / Zavod za nosive konstrukcije i tehničku mehaniku

paulina.krolo@uniri.hr

<https://portal.uniri.hr/Portfelj/891>



Mentor/komentor:

izv. prof. dr. sc. Davor Grandić/izv. prof. dr. sc. Mladen Bulić

Naslov doktorskog rada:

Utjecaj ponašanja vijčanih priključaka na potresni odziv čeličnih okvira (Influence of Bolted Joints Behaviour on Seismic Response of Steel Frames)

Dr. sc. Paulina Krolo je 2008. godine diplomirala na Konstruktorskom smjeru Građevinskog fakulteta u Rijeci. Poslijediplomski doktorski studij Građevinskog fakulteta u Rijeci upisala je 2009. (smjer Mehanika konstrukcija), a doktorski rad obranila 9. ožujka 2017. godine.

U doktorskom radu izrađen je matematički model histerezne anvelope priključka s obostrano produljenom čelnom pločom u vijčanoj izvedbi. Model histerezne anvelope razvijen je s ciljem što realnije procjene ponašanja čeličnih okvira u potresu primjenom nelinearne statičke metode. Ponašanje okvira, dobiveno primjenom novog modela priključka, uspoređeno je s ponašanjem okvira koji uzima u obzir monotona svojstva priključaka te je verificirano nelinearnim dinamičkim proračunom na realne potrese, gdje su svojstva priključaka modelirana modificiranim Richard-Abbottovim modelom. Za definiranje ponašanja priključka pod utjecajem potresnog djelovanja izrađeni su numerički modeli u numeričkom programu ABAQUS. Provedena su eksperimentalna ispitivanja europskih mekih čelika S275 i S355 s ciljem utvrđivanja cikličkih svojstava. Za dobivena ciklička svojstva materijala provedena je kalibracija parametara prema Chabocheovog modelu koji uzima u obzir izotropno-kinematičko očvršćivanje čelika te je u ovom doktoratu po prvi puta primijenjen za definiranje svojstava cikličkog ponašanja čelika s promjenjivim deformacijama. Modelirano je i oštećivanje materijala s modelom sloma. Ovakav model materijala koji obuhvaća očvršćivanje, degradaciju čvrstoće i krutosti te model oštećivanja prvi je puta ugrađen u model priključka.

Područja znanstveno – istraživačkog interesa dr. sc. Pauline Krolo vezana su za ispitivanje svojstava čelika pri utjecaju potresa, numeričko modeliranje priključaka pri cikličkim djelovanjima te analize čeličnih konstrukcija u potresu.

Dr. sc. Sanja Šurdonja, mag. ing. aedif.

Katedra za prometnice / Zavod za prometnice,
organizaciju i tehnologiju građenja i arhitekturu

sanja.surdonja@uniri.hr

<https://portal.uniri.hr/Portfelj/894>



Mentor:

prof. dr. sc. Vesna Dragčević

Naslov doktorskog rada:

Numerički model provozne brzine kružnoga raskrižja (Numerical Model of Travel Speed through the Roundabout)

Dr. sc. Sanja Šurdonja je diplomirala na Građevinskom fakultetu u Rijeci 2003. g. završivši Sveučilišni diplomski studij, usmjerenje Prometnice. Poslijediplomski doktorski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, smjer Prometnice, upisuje 2006. godine, a doktorski rad obranila je 25. svibnja 2017. godine.

U doktorskome radu analizirana je problematika određivanja provozne brzine vozila u kružnom raskrižju te je razvijen originalni model provozne brzine vozila na ulazu, u sredini kružnog raskrižja te na izlazu iz raskrižja. Model je razvijen na temelju opsežnih terenskih ispitivanja provedenih sustavom brojača prometa te primjenom osobnog vozila s Globalnim Navigacijskim Satelitskim Sustavom (GNSS). U usporedbi s postojećim modelima postignuta je veća pouzdanost primjene modela razvijenih u ovom radu, što predstavlja značajan doprinos preciznijem utvrđivanju provoznih brzina na kružnom raskrižju, a koje su bitan element sigurnosti odvijanja prometa na kružnim raskrižjima.

Primjena modela razvijenih u radu na proračun provozne brzine na ulazu, u sredini kružnog raskrižja i na izlazu, doprinos je postupku projektiranja optimalnog oblikovanja elemenata kružnog raskrižja, posebno s aspekta zadovoljenja uvjeta sigurnosti i kapaciteta.

Područja znanstveno-istraživačkog interesa dr. sc. Sanje Šurdonja su: optimiranje prometne infrastrukture (raskrižja, kružna raskrižja, sigurnost odvijanja prometa, uvjeti za odvijanje nemotoriziranih vidova prometa), mikrosimulacije te ispitivanja koja se provode u sklopu Laboratorija za prometnice (termička svojstva materijala prometnih površina, trenja kolnih površina).

Dr. sc. Željko Smolčić, dipl. ing. građ.

Katedra za nosive konstrukcije / Zavod za
nosive konstrukcije i tehničku mehaniku

zeljko.smolcic@uniri.hr

<https://portal.uniri.hr/Portfelj/1064>



Mentor:

prof. dr. sc. Joško Ožbolt

Naslov doktorskog rada:

**Modeliranje betona armiranog čeličnim vlaknima:
trodimenzionalni numerički mezo-model** (Modeling Steel Fiber
Reinforced Concrete: Three-Dimensional Numerical Meso Scale Model)

Dr. sc. Željko Smolčić je 1991. godine diplomirao na Općem smjeru Građevinskog fakulteta u Rijeci. Magistarski rad pod nazivom "Proračun armiranobetonskih okvira po teoriji plastičnosti" obranio je 12. rujna 1997. godine pod mentorstvom prof. dr. sc. Ivana Tomičića i stekao akademski stupanj magistra Tehničkih znanosti iz područja Građevinarstva. Sveučilišni poslijediplomski doktorski studij upisuje 2006. godine na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Doktorsku radnju pod naslovom „Modeliranje betona armiranog čeličnim vlaknima: Trodimenzionalni numerički mezo-model“ obranio je 3. ožujka 2017. godine i stekao akademski stupanj doktora znanosti iz znanstvenog područja Tehničke znanosti, znanstvenog polja Temeljne tehničke znanosti.

Najznačajniji izvorni doprinosi kandidata su: (i) Rezultati vlastitih zahtjevnih eksperimentalnih ispitivanja provedeni na betonskim gredama armiranim čeličnim vlaknima; (ii) Pokazano je da zahtjevni mezo-model betona, baziran na mikroravninskom modelu betona te diskretnom konstitutivnom zakonu veze između čeličnih vlakana i betona može realno simulirati ponašanje betona armiranog čeličnim vlaknima; (iii) Nelinearnom numeričkom analizom vlastitih eksperimenata pokazano je da efektivni konstitutivni model bonda ovisi o volumenskom udjelu vlakana u betonu; (iv) Formuliran je prijedlog konstitutivnog zakona veze između čeličnih vlakana i betona kao funkcija volumenskog udjela vlakana u betonu.

Područja znanstveno –istraživačkog interesa dr. sc. Željka Smolčića su istraživanja u području nosivih konstrukcija od armiranog i prednapetog

betona. U svojim istraživanjima posebnu pažnju posvećuje problemima nosivosti i duktilnosti te potresne otpornosti elemenata i konstrukcija.

Počasna zvanja i titule

Professor emeritus

Dr. sc. Čedomir Benac, mag. ing. geol.

Redoviti profesor u trajnom zvanju

Zavod za hidrotehniku i geotehniku

cbenac@uniri.hr

<https://portal.uniri.hr/portfelj/1694>



Rođen je 9. lipnja 1950. u Bakarcu. Diplomirao je 1974. na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, gdje je 1981. stekao akademski stupanj magistra znanosti, a 1995. i doktora znanosti. Poslije završetka studija geologije u nekoliko je tvrtki stjecao stručno iskustvo te vodio i koordinirao složena geotehnička istraživanja za potrebe građenja i prostornog planiranja. Od rujna 1991. do srpnja 1992. obavljao je dužnost časnika u Hrvatskoj vojsci.

Njegova sveučilišna djelatnost započinje u ožujku 1990., kada je kao viši stručni suradnik zaposlen na Fakultetu graditeljskih znanosti u Rijeci, tada sastavnici Građevinskog instituta Zagreb. Nakon organizacijskog razdvajanja u srpnju 1991., do rujna 2001. pola radnog vremena bio je i djelatnik Instituta građevinarstva Hrvatske u zvanjima stručnog savjetnika i višeg znanstvenog suradnika.

Na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci izabran je 1996. u znanstveno-nastavno zvanje docenta, a 2008. godine potvrđen je u zvanje redovitog profesora u trajnom zvanju. Na fakultetu je obavljao i dužnosti pročelnika Katedre za hidrotehniku i geotehniku, šefa Katedre za geotehniku te prodekana za znanstveno-istraživačku djelatnost i prodekana za poslovne odnose. Bio je predmetni nastavnik niza kolegija na preddiplomskom, diplomskom i poslijediplomskom doktorskom sveučilišnom studiju te na stručnim studijima, preddiplomskom i specijalističkom diplomskom, a od ak. god. 2008./2009., u četverogodišnjem je razdoblju bio i gostujući profesor na preddiplomskom studiju Znanost o moru na Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli.

U svojoj je bogatoj sveučilišnoj karijeri bio mentor na ukupno 77 završnih i diplomskih radova studenata našeg fakulteta, ali i mentor brojnih diplomskih radova studenata Rudarsko-geološko-naftnog i Prirodoslovno-matematičkog fakultetu u Zagrebu. Bio je mentor doc. dr.

sc. Igoru Ružiću na doktorskom radu, a sada je mentor na takvom radu u sklopu Doctoral school of Karstology Univerze Nova Gorica.

Više je godina aktivno sudjelovao u provedbi i organizaciji terenske nastave za studente geologije Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, studente geologije i studente znanosti o okolišu Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu te studente inozemnih sveučilišta Università di Venezia i University of Lancaster. Četiri je godine bio predavač na specijalističkom tečaju „Metodologije i tehnike u primjeni europskih direktiva u području procjene utjecaja zahvata na okoliš i strateške procjene utjecaja plana i programa na okoliš“. Sudjelovao je i u realizaciji nastavnih programa u sklopu Tempus application form Joint European Project te bio recenzent 8 sveučilišnih nastavnih programa.

Objavio je 139 znanstvenih radova kao dijelova znanstvenih knjiga i monografija u međunarodnim i nacionalnim znanstvenim časopisima te u zbornicima radova s međunarodnih i nacionalnih znanstvenih i stručnih skupova. Od 1984. surađivao je na brojnim znanstvenim projektima, nacionalnim i međunarodnim. U razdoblju od 2005. - 2013. u dva je mandata bio član Matičnog odbora za područje tehničkih znanosti.

Uz nastavni i znanstveni rad aktivno je sudjelovao u inženjersko-geološkim istraživanjima krških i flišnih predjela. Izradio je više od petsto stručnih izvješća i studija. Kao aktivni ronilac posebno se bavio istraživanjem jadranskog podmorja.

Član je uredništva znanstvenog časopisa *Geologia Croatica*. Član je Savjeta za prirodnoznanstvena istraživanja Jadrana, koji djeluje pri HAZU-u, i recenzent inženjerskogeološke karte Republike Hrvatske.

Umirovljen je 30. rujna 2016., a odlukom Senata Sveučilišta u Rijeci od 4. travnja 2017. izabran je u počasno zvanje **professor emeritus**.

Profesor Čedomir Benac međunarodno je prepoznatljiv znanstvenik i sveučilišni nastavnik koji je svojim dugogodišnjim radom dao veliki doprinos znanstvenoj prepoznatljivosti Sveučilišta u Rijeci. Također je vrlo značajan njegov doprinos unaprjeđenju i kvaliteti nastave kao i organizaciji i vođenju Građevinskog fakulteta u Rijeci. Premda je nabiranje znanstvenih i stručnih dostignuća uobičajeno u ovakvim prigodama, oni koji profesora poznaju kao dugogodišnjeg kolegu sa Zavoda za hidrotehniku i geotehniku, ne žele propustiti priliku istaknuti i njegove izuzetne ljudske osobine, pa makar i na kraju predstavljanja. Svi mi koji smo imali privilegiju s njime surađivati, dobro smo upoznali njegovu suosjećajnost i solidarnost. Znali smo da mu se možemo obratiti

s punim povjerenjem, da će nas saslušati i svakako pokušati pomoći u rješavanju problema u kojima smo se zatekli. Rijetke su to vrline u današnjem okruženju i zato zaslužuju biti istaknute.

pripremila Nevenka Ožanić

Nagrade i priznanja studentima

Daniel Brusić

na 44. Danu Sveučilišta u Rijeci, *Dies Academicus*, 21. travnja 2017., na dodjeli potvrdnica, zahvalnica i nagrada, u Auli Magni Rektorata, primio je Rektorovu nagradu za izvrsnost.



Stjepan Emil Šćulac,

student 1. godine Preddiplomskog stručnog studija, dobitnik je brončane medalje u rukometu na 23. ljetnim olimpijskim igrama za gluhe i nagluhe osobe u Samsunu, Turska.



Vilson Kuqi,

student 3. godine Preddiplomskog sveučilišnog studija, natječe se u Kickboxingu u seniorskoj kategoriji do 60 kg, a 2017. godine osvojio je 2. mjesto na Europskom kupu (WAKO federacija i HR kickboxing savez) i 3. mjesto na državnom Prvenstvu (HR kickboxing savez).



Nagrade i priznanja djelatnicima

Doc. dr. sc. Maja Gaćeša i mr. sc. Alka Korin Lustig

prilikom obilježavanja 44. Dana Sveučilišta u Rijeci *Dies Academicus*, 21. travnja 2017., u Auli Magni Rektorata, na dodjeli potvrdnica, zahvalnica i nagrada, primile su nagrade za nastavnu izvrsnost.



Dr. sc. Paulina Krolo

dobila je nagradu Hrvatskog saveza građevinskih inženjera za najbolji doktorski rad iz područja Građevinarstvo u 2016. i 2017. pod naslovom „Utjecaj ponašanja vijčanih priključaka na potresni odziv čeličnih okvira“.

Izv. prof. dr. sc. Nana Palinić

dobila je godišnju nagradu Grada Rijeke za izuzetan doprinos istraživanju povijesti hrvatske i riječke arhitekture i sveobuhvatno istraživanje arhitekture kazališta Rijeke. Također, kao autorica monografije „Riječka kazališta - nastanak, kontinuitet i značenje kazališnih zgrada i scenskih

prostora u razvitku urbane strukture“, za istaknuti doprinos na području povijesti umjetnosti primila je povelju Društva povjesničara umjetnosti Hrvatske „Radovan Ivančević“.

Professor emeritus Ivan Vrkljan

na svečanoj dodjeli u Cape Townu održanoj 4. listopada 2017., primio je ISRM Fellows Award, nagradu Međunarodnog društva za mehaniku stijena (International Society for Rock Mechanics), za aktivnosti u povezivanju europskih članica Međunarodnog društva s ostalim članicama svijeta. Skupština Slovenskog geotehničkog društva na svojoj je sjednici 10. studenoga 2017. profesora emeritusa Ivana Vrkljana proglasila počasnim članom i dodijelila mu povelju zaslužnog člana u znak priznanja za znanstveni i stručni rad te za predstavljanje društva u svijetu.

Dr. sc. Natalija Bede

dobila je nagradu za najbolji rad na skupu „Zajednički temelji 2017“ dodijeljenu od strane Organizacijskog odbora skupa „Zajednički temelji 2017“ Građevinskog fakulteta u Zagrebu.

Marko Franković

primio je priznanje Hrvatskog saveza za zelenu gradnju, za projekt vrtića „Katarina Frankopan“ na Krku, kao drveno montažne gradnje u kategoriji Green projekti obrazovnog sektora.

Hrvatska grupa za klizišta

koju čine znanstvenici s Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta u Zagrebu i Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci proglašena je na 4. World Landslide Forumu „Advancing Culture of Living with Landslides“ Svjetskim centrom izvrsnosti za umanjene opasnosti od klizišta od strane Međunarodnog konzorcija za klizišta (International Consortium on Landslides) za period 2017.-2020. godine. U Hrvatsku grupu za klizišta uključeni su znanstvenici Katedre za geotehniku: prof. dr. sc. Željko Arbanas (voditelj Hrvatske grupe za klizišta), doc. dr. sc. Vedran Jagodnik, doc. dr. sc. Sanja Dugonjić Jovančević, dr. sc. Martina Vivoda Prodan, Petra Đomlija, Josip Peranić i Sara Pajalić.



Umirovljeni djelatnici

Mr. sc. Alka Korin – Lustig, dipl. ing. mat

Viši predavač

Zavod za matematiku, fiziku i druge predmete /
Katedra za matematiku

lustig@uniri.hr

<https://portal.uniri.hr/Portfelj/1126>



Rođena je 2. prosinca 1952. u Rijeci. Diplomirala je 1976. na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu, usmjerenje Praktična matematika. 1985. je obranila magistarski rad pod naslovom „Informatički aspekti projektiranja pomoću računala u području građevinarstva“ na poslijediplomskom studiju iz informacijskih znanosti na Fakultetu organizacije i informatike u Varaždinu, pod mentorstvom prof. dr. Nenada Bićanića.

Prva radna iskustva stjecala je od 1977. godine kao samostalni programer u raznim računskim centrima u privredi (Riječka industrija odjeće, Riječka banka). Na tadašnjem Fakultetu graditeljskih znanosti u Rijeci počinje raditi 1977. godine, najprije u svojstvu asistenta iz matematike, a od 1983. godine, uz vježbe iz predmeta Matematika, održava i vježbe iz predmeta Elektronička obrada podataka. 1987. godine izabrana je u znanstveno zvanje asistent iz informacijskih znanosti, a 1986. u trajno zvanje predavača iz predmeta Elektronička obrada podataka (kasnije nazvan Osnove informatike na sveučilišnom i predmeta Informatika na stručnom studiju), od kada preuzima i predavanja i vježbe iz istog predmeta. 1996. godine je izabrana u nastavno zvanje viši predavač za znanstveno područje Informacijske znanosti. Uvođenjem Bolonjskog sustava, uvodi nove izborne kolegije na preddiplomskom sveučilišnom studiju (Uvod u programiranje i Računalni programi) te mijenja naziv predmeta Osnove informatike u Informatika. Nakon odvajanja Građevinskog fakulteta i Građevinskog instituta 1999. godine, ostaje dvadeset godina zaposlena na Institutu građevinarstva Hrvatske-Poslovni centar Rijeka (IGH) na pola radnog vremena kao voditelj informatičke podrške, gdje je izradila programsku podršku za nekoliko specijaliziranih projekata u suradnji s Gradom Rijeka.

Sudjelovala je u realizaciji više projekata: 1991.-1995. „Antropološki uvjeti efikasnosti rada u građevinarstvu“ (voditelj Juraj Plenković), 1996.

„Stres uzrokovan nesrećama u graditeljstvu“ (voditelj Juraj Plenković), oba financirana od Ministarstva znanosti, tehnologije i informatike, „Praćenje i unaprjeđenje kvalitete studiranja na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci“, Nacionalna zaklada za znanost, visoko školstvo i tehnologijski razvoj Republike Hrvatske, projekt financiran od strane Sveučilišta u Rijeci za Rad na razvoju e-kolegija „Uvod u programiranje“, Obrazovanje mladeži za informacijsko društvo financiran od strane MZOŠ-a te EQUIBELT Tempus projektu. Uz aktivno poznavanje njemačkog, engleskog, francuskog i talijanskog jezika, tijekom svojega radnog vijeka pohađala je brojne radionice, seminare i internacionalne škole u svrhu stručnog usavršavanja.

Od 1995. do umirovljenja djelovala je kao Carnet koordinator Građevinskog fakulteta u Rijeci, a od 1999. do 2001. godine je bila članica Predsjedništva Vijeća korisnika Carneta. Od 1995. godine aktivno radi na edukaciji studenata za korištenje lokalnih i globalnih mreža. Uz redovan rad sa studentima, organizirala je rad u računalnoj učionici te osnovala naprednu studentsku grupu koja je sudjelovala u uređivanju fakultetske web stranice (www.gradri.hr) te web stranica kolegija Informatika. U svom je radu poseban trud ulagala u unaprjeđenje nastave te u unaprjeđenje računalne infrastrukture i opremanje računalnih učionica na fakultetu. Pokretač je uvođenja sustava e-učenja na fakultetu. Zajedno s tadašnjim suradnicima je 2006. godine na lokalnoj mreži fakulteta pokrenula platformu za e-učenje FRAK. Godinama je održavala i unaprjeđivala sustav, kako bi pružao podršku svim nastavnicima na matičnom fakultetu. Mentorirala je brojne završne radove na preddiplomskom sveučilišnom i stručnom studiju.

Dobitnica je Priznanja za poseban doprinos razvoju e-učenja na Sveučilištu u Rijeci 2009. godine, a 2017. godine Sveučilište u Rijeci joj je dodijelilo Nagradu za nastavnu izvrsnost. Objavila je više stručnih radova na temu pedagoških aspekata uvođenja e-učenja i implementaciju e-učenja te uporabe programskih alata u nastavi, kao i neke zanimljive stručne radove o primjeni web tehnologija u sustavu upravljanja građevnom ugovornom dokumentacijom i primjeni programskih alata u građevinskom projektiranju. Također je objavila više znanstvenih radova iz područja inženjerske matematike, analize i obrade podataka te modeliranja disperzije i dilucije otpadnih voda. Od 2002. godine redovito je sudjelovala na Mipro konferencijama. Recenzirala je radove za Zbornik radova Građevinskog fakulteta u Rijeci te za međunarodni simpozij Mipro Opatija – Računala u obrazovanju.

Kao višegodišnju suradnicu na nastavnim kolegijima najviše me oduševio njezin iskreni entuzijazam u organiziranju i usavršavanju nastavnog

sadržaja te metodologije izvođenja nastave, uz konstantno propitkivanje studentskih potreba i interesa, a koji je bio prisutan do zadnjeg dana rada na fakultetu. Unatoč tome što je po obrazovanju matematičar, trudila se i u najvećoj mogućoj mjeri uspijevala sadržaj kolegija prilagođavati potrebama građevinske struke te ih obogatiti praktičnim primjerima.

pripremila Neira Torić Malić

Novi znanstveno-nastavni djelatnici

**Dr. sc. Anamarija Perušić Pribanić, dipl.
ing. mat.**

Katedra za matematiku / Zavod za matematiku,
fiziku i druge predmete

anamarija.perusic@gradri.uniri.hr

<https://portal.uniri.hr/Portfelj/973>



Diplomirala je 2007. godine na smjeru Financijska i poslovna matematika Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, pri Matematičkom odjelu u Zagrebu. Iste godine upisala je poslijediplomski doktorski studij matematike. U veljači 2008. zaposlena je kao znanstveni novak na znanstvenom projektu „Numerički 3D kemo-higro-termomehanički model betona“ (voditelj: prof. dr. sc. Joško Ožbolt).

Doktorski rad pod naslovom “Poopćenja Steffensenove nejednakosti” obranila je 17. prosinca 2013. (mentor: doc. dr. sc. Julije Jakšetić).

Suradnica je na znanstvenom projektu „Višeskalni model betona s identifikacijom parametara“ (voditelj: prof. dr. sc. Ivica Kožar) te na sveučilišnoj potpori znanstvenim istraživanjima „Multi-rezolucijsko modeliranje konstrukcija s parametarskom identifikacijom“ (voditelj: prof. dr. sc. Ivica Kožar).

Sunositeljica je kolegija “Matematika 1” i suradnica na kolegijima Operacijsko istraživanje i linearno programiranje, Matematička analiza 2 i Informatika u inženjerstvu.

Dr. sc. Željko Smolčić, dipl. ing. građ.

Katedra za nosive konstrukcije / Zavod za nosive konstrukcije i tehničku mehaniku

zeljko.smolcic@uniri.hr

<https://portal.uniri.hr/Portfelj/1064>



Diplomirao je na Općem smjeru Građevinskog fakulteta, Sveučilište u Rijeci, 1991. godine. Magistrirao je na Građevinskom fakultetu, Sveučilište u Zagrebu, 1997. godine.

Poslijediplomski doktorski studij završio je na Građevinskom fakultetu u Rijeci 3. ožujka 2017. godine obranom doktorskog rada pod naslovom „Modeliranje betona armiranog čeličnim vlaknima: Trodimenzionalni numerički mezo-model“ i stekao akademski stupanj doktora znanosti iz znanstvenog područja Tehničke znanosti, znanstvenog polja Temeljne tehničke znanosti. Aktivno je sudjelovao u realizaciji brojnih znanstvenih projekata: „Nelinearna numerička analiza prodora ploče i stupa“ (1993.-1995.), „Numerička analiza kvazi-krtih materijala“ (1997.-2001.), „Numeričko modeliranje kvazi-krtih materijala“ (2002.-2006.), „Numerički 3D kemo-higro-termo-mehanički model betona“ (2007.-2011.). U razdoblju od 2013. godine do danas, suradnik je na znanstveno-istraživačkom projektu Sveučilišta u Rijeci „Procjena oštećenja i ojačanja građevinskih konstrukcija“.

Područja znanstveno-istraživačkog interesa dr. sc. Željka Smolčića su istraživanja u području nosivih konstrukcija od armiranog i prednapetog betona. U svojim istraživanjima posebnu pažnju posvećuje problemima nosivosti i duktilnosti te potresne otpornosti elemenata i konstrukcija.

Nositelj je kolegija „Osnove betonskih i zidanih konstrukcija“, „Betonske i zidane konstrukcije“ i „Montažne konstrukcije“ na Stručnom preddiplomskom studiju. Nositelj je kolegija „Prednapete betonske konstrukcije“ na Sveučilišnom diplomskom studiju.