

GRAĐEVINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTA U RIJECI



Zbornik radova

XIII

Rijeka, 2010.

ZBORNİK RADOVA SVEUČILIŠTA U RIJECI
MANUALIA UNIVERSITATIS STUDIORUM FLUMINENSIS



GRAĐEVINSKI FAKULTET
Sveučilišta u Rijeci

Izdavač:

Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, Viktora Cara Emina 5

Za izdavača:

Aleksandra Deluka-Tibljaš, dekan

Glavni i odgovorni urednik:

Gordan Jelenić

Urednički odbor:

Željko Arbanas

Diana Car-Pušić

Aleksandra Deluka-Tibljaš

Barbara Karleuša

Adresa uredništva:

Rijeka, Viktora Cara Emina 5

Grafičko rješenje omota:

Alen Karlović, student

Grafička obrada, prijelom i tisak:

Digital point tiskara d.o.o.

Naklada:

300 primjeraka

Kategorizacija:

Znanstvena monografija

ISSN 0350-8552
ISBN 978-953-6953-21-9

GRAĐEVINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTA U RIJECI

ZBORNİK RADOVA

KNJIGA XIII

Rijeka, prosinac 2010.

**GRAĐEVINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTA U RIJECI****ZBORNİK RADOVA
KNJIGA XIII****Autori:**

Diana Car-Pušić
Marijana Cuculić
Ivan Dražić
Goran Gjetvaj
Davor Grandić
Nataša Grgorinić
Ivona Gudac
Vedran Jagodnik
Gordan Jelenić
Ivan Marović
Nermina Mujaković
Ivana Opala
Nevenka Ožanić
Ines Radošević
Dragan Ribarić
Andrija Rubinić
Josip Rubinić
Ivana Sušanj
Paulo Šćulac
Leo Škec
Ana Šuljić
Sanja Šurdonja
Miran Tuhtan
Marinko Đ. Učur
Goran Volf
Helena Wöfl
Dejan Zupan
Elvis Žic

RIJEČ DEKANA

U 2010. godini Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci nastavio je sa pozitivnim trendom intenziviranja znanstvene produkcije u formi članaka u časopisima i na konferencijama. Prema Izvještaju o provedbi strategije Sveučilišta u Rijeci za 2009. godinu uočava se da je broj radova nastavnika Fakulteta objavljenih u časopisima indexiranim u SCI i CC bazi gotovo trostruko veći od broja ove vrste radova publiciranih 2007. godine.

Strategija Fakulteta na kojoj su nastavnici, djelatnici i studenti radili ove godine utvrdila je pravce razvoja koje jamče razvoj Fakulteta kao “aktivnog i međunarodno prepoznatog čimbenika u promoviranju postojećeg i stvaranju novoga znanja iz područja građevinarstva i srodnih znanstvenih disciplina kroz sinergiju s visokoškolskim obrazovanjem na svim razinama temeljenim na ishodima učenja i cjeloživotnom obrazovanju” (Izvadak iz Vizije Fakulteta). U tom cilju važno je njegovati i nastavljati dobre tradicije koje su, kroz sada već 41 godinu razvoja Fakulteta, nastajale, a jedna od tih tradicija je svakako i Zbornik radova.

Veseli činjenica da u trogodišnjem kontinuitetu izlazi ovogodišnji XIII. Zbornik radova Fakulteta sa istim brojem objavljenih radova, 13. Na radovima sudjeluje ukupno 28-oro autora koji su ili djelatnici ili, na neki način, suradnici našega Fakulteta. Osim njih doprinos kvaliteti objavljenih radova dali su i svi oni koji su se uključili u recenziranje istih. Svima im se zahvaljujem. Urednik i ovog izdanja Zbornika je prof. dr. Gordan Jelenić. Vjerujem da svi autori i recenzenti prepoznaju sa koliko predanosti prof. Jelenić koordinira sve poslove koje izdavanje ovakve publikacije traži i da su mu, baš kao i ja, zahvalni na uloženom vremenu i trudu.

Željela bih, u ime Fakulteta i osobno, čestitati svim autorima radova, a posebno onima koji u Knjizi XIII Zbornika Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci ove godine objavljuju svoj prvi znanstveni ili stručni rad uz uvjerenje da ćemo idući broj Zbornika pripremati i promovirati u novoj zgradi na Kampusu Sveučilišta u Rijeci na Trsatu.

Dr. sc. Aleksandra Deluka-Tibljaš,
dekan

PREDGOVOR

Zbornik radova Građevinskoga fakulteta Sveučilišta u Rijeci godišnje je izdanje znanstvenih i stručnih radova u kojima nastavnici i studenti Fakulteta te ostali znanstvenici i stručnjaci objavljuju rezultate svojega istraživanja i stručnoga rada iz područja djelatnosti Fakulteta. Osnovna uloga Zbornika jest da omogući objavljivanje radova studenata završnih godina dodiplomskoga i diplomskoga studija uz mentorsko vođenje nastavnoga osoblja Fakulteta i ovogodišnje izdanje Zbornika predstavlja vam šest takvih od ukupno trinaest objavljenih radova. U dodatnih šest radova kao autori se pojavljuju doktoranti Fakulteta, dok je preostali rad samostalni rad vanjskog suradnika Fakulteta.

Radovi obavljani u Zborniku radova Građevinskoga fakulteta Sveučilišta u Rijeci u sebi sadržavaju značajan udio rezultata koji ranije nisu bili objavljeni, tako da je u njemu moguće objaviti posve novi rad ili predstaviti proširenu verziju drugdje objavljenog rada. U ovome izdanju Zbornika predstavljeni su radovi iz područja hidrotehnike, matematike, mehanike, nosivih konstrukcija, organizacije građenja, urbanizma i građevinske regulative.

Kao i prošle i ove godine su svi radovi prošli detaljno anonimno istorazinsko recenziranje od strane najmanje dvoje znanstvenika ili stručnjaka iz područja rada. Recenzenti su bili upućeni u to da provjere je li rad tehnički i metodološki korektan, zadovoljavajuće strukturiran, jezično, simbolički, numerički i grafički jasno predstavljen te da li se na odgovarajući način referira na postojeće znanje i rezultate iz područja rada. U narednim izdanjima Zbornika i dalje će se ustrajati na anonimnom istorazinskom recenziranju pristiglih radova, a nastojat će se potaknuti autore da svoje radove objavljuju ne samo na hrvatskome, već i na engleskome jeziku. Kao i prošle, i ove godine Zbornik izlazi u crno-bijeloj tehnici, ali cjelokupni tekst Zbornika na priloženom CD-u dostupan je i u tehnici u kojoj je rad originalno napravljen.

U ime Fakulteta svim autorima se zahvaljujem na odabiru Zbornika radova Građevinskoga fakulteta Sveučilišta u Rijeci kao medija za objavu svojih rezultata, a svim recenzentima na podršci Zborniku iskazanoj kroz bezrezervnu spremnost na recenziranje te uloženo vrijeme i predanost poslu prilikom stručnog ocjenjivanja pristiglih radova. Zbornik koji je pred vama rezultat je zajedničkog truda autora i recenzenata i kao urednika neobično me veseli da mogu reći da je s takvim stavom prema Zborniku njegovo redovito godišnje izlaženje zagarantirano i postaje još jednom redovitom godišnjom aktivnošću u periodu velikih i značajnih promjena u životu Fakulteta i Sveučilišta.

SADRŽAJ

<i>Ivana Opala, Nevenka Ožanić:</i> Hidrološka analiza sliva rijeke Dobre	11
<i>Andrija Rubinić, Nevenka Ožanić:</i> Hidrologija sliva Dubračine	33
<i>Ivana Sušanj, Goran Gjetvaj, Nevenka Ožanić, Elvis Žic:</i> Mehanizmi formiranja postupnog djelomičnog rušenja nasute brane – brana Botonega	69
<i>Ana Šuljić, Josip Rubinić:</i> Analiza vodnog režima Vranskog jezera u Dalmaciji	91
<i>Helena Wölfl, Goran Volf, Josip Rubinić:</i> Modelska analiza navodnjavanja kišnicom na jadranskim otocima	113
<i>Ines Radošević, Vedran Jagodnik:</i> Baricentrička forma Lagrangeove interpolacije	131
<i>Leo Škec, Nermina Mujaković, Ivan Dražić:</i> Numerička analiza aproksimacija derivacije metodom konačnih razlika	145
<i>Nataša Grgorinić, Davor Grandić, Paulo Šćulac:</i> Sanacija armiranobetonske konstrukcije lansirne stanice torpeda u Rijeci	169
<i>Paulo Šćulac, Dejan Zupan, Gordan Jelenić:</i> Integriranje polja naprezanja u armiranobetonskim poprečnim presjecima	191
<i>Miran Tuhtan, Dragan Ribarić:</i> Usporedba proračunskih konstruktivnih modela na primjeru razuprtog pješačkog mosta “Malonji” u Rijeci	213
<i>Diana Car-Pušić, Ivan Marović, Ivona Gudac:</i> Važnost projekta organizacije građenja u pripremi izvođenja građevinskih radova	225

Marijana Cuculić, Sanja Šurdonja:

Pregled novijih kolničkih konstrukcija koje ublažavaju
efekt urbanih toplinskih otoka245

Marinko Đ. Učur:

Koordinatori za zaštitu na radu kod investitora,
glavnog projektanta i poslodavca263

Hidrološka analiza sliva rijeke Dobre

Hydrological Analysis of Dobra River Catchment Area

Ivana Opala, Nevenka Ožanić

Sažetak. U radu su prikazani rezultati hidrološke analize sliva rijeke Dobre koja predstavlja poseban krški fenomen. Njena su prirodna svojstva i to kako ona hidrološko-hidrogeološka tako i ona ekološka, značajno poremećena antropogenim utjecajima.

Standardnim su hidrološkim metodama provedene analize vodnih pojava u slivu rijeke Dobre. Analizirani su hidrološki nizovi mjereni na sedam stanica (četiri na Gornjoj i tri na Donjoj Dobri). Analizirani su i gubici duž toka te utjecaju rada HE Gojak na promjenu hidrološkog režima kako Donje tako i Gornje Dobre. Spomenuta je i problematika pojave poplava na Gornjoj Dobri u gradu Ogulinu uzrokovanih ograničenim kapacitetom Đulinog ponora.

Ključne riječi: hidrologija krša, ponornica, protoka, gubici vode, rijeka Dobra

Abstract. This paper presents the results of hydrological analysis of the Dobra river basin which is a special karst phenomenon. Its complex natural features, especially the hydrological-hydrogeological and ecological ones, are significantly disturbed by the anthropogenic influences.

The hydrological analyses of water occurrence in the River Dobra were carried out by means of the standard hydrological methods. The paper analyses the hydrological series measured at seven stations (four on the upstream and three on the downstream part of the Dobra river). The losses along the course as well as the impact of the Gojak power plant to the changes in the hydrological regime of the upstream and the downstream part of the Dobra river were also analysed. The paper also addresses the problems of flood occurrence on the upstream part of the Dobra river in Ogulin due to a limited capacity of the Đula abyss.

Key words: karst hydrology, gulf, abyss, discharge, Dobra river

1. Uvod

Dobra je važna pritoka Kupe, a sastoji se od tri izražena dijela toka. Prvi poznat kao Gornja (Ogulinska) Dobra, od izvora na sjeveroistočnim obroncima Mlade Gore, nedaleko od naselja Ravna Gora, do Đulina ponora u Ogulinu, gdje se njezin tok gubi u podzemlju, slijedi podzemni tok do Gojaka, te konačno dio do ušća u rijeku Kupu poznat pod nazivom Donja (Gojačka) Dobra. Umjetnim putem dio sliva Zagorske Mrežnice prevođenjem cjevovodima pripojen je slivu Dobre. Područje rijeke Dobre tipični je predstavnik krša s mnoštvom speleoloških objekata od kojih je, zbog svog dominantnog utjecaja na vodni režim, najznačajniji špiljski sustav Đulin ponor – Medvednica.

Tok rijeke Dobre podijeljen je na tri djela. Tok Gornje ili Ogulinske Dobre dug je 51,2 km. Rijeka ponire u Đulinom ponoru koji se nalazi u samom gradu Ogulinu. Drugi dio, tj. podzemni tok rijeke Dobre, protječe kroz do danas otkriveni sustav krških kanala i kaverni dug 16.396 m, te na površinu izbija kod sela Gojak kroz niz stalnih i povremenih krških izvora. Udaljenost zračnom linijom između Đulinog ponora i sustava izvora je 4,6 km. Treći dio pod nazivom Donja Dobra s ušćem u rijeku Kupu dug je 52,1 km. Duž površinskih tokova kako Gornje tako i Donje Dobre postoje brojne tzv. suspendirane dionice na kojima u određenim hidrološko-hidrogeološkim situacijama voda ponire u krško podzemlje. Prirodni režim rijeke Dobre značajno je poremećen izgradnjom hidroelektrane Gojak koja je započela s radom 1959. godine. U okviru tog sustava izgrađena je akumulacija Sabljaki na susjednom vodotoku Zagorskoj Mrežnici. Iz nje se voda tunelom dovodi do HE Gojak. Posljedica toga je povećanje prosječnih srednjih protoka Donje Dobre na vodomjernom profilu Trošmarija nizvodno od HE Gojak od prirodnih 13,6 na 28,3 m³/s. Na Gornjoj Dobri 2,1 km uzvodno od Đulinog ponora izgrađena je mala akumulacija Bukovik.

Kako zbog već spomenutih povoljnih topografskih i hidroloških prilika rijeka Dobra ima veliki hidroenergetski potencijal na ukupnom toku planira se izgraditi još pet elektrana. Do sada je izgrađen HE sustav Gojak, te Ličko Lešće koje je pri završetku gradnje. HE sustav Gojak ima veliki utjecaj na hidrologiju u slivu Dobre i koristi vode dviju ponornica, Ogulinske Dobre, koja nakon poniranja napaja vrelo Gojačke Dobre i Zagorske Mrežnice.

U radu su obrađeni meteorološki podaci o oborinama i temperaturama s dvije meteorološke postaje, Ogulin i Karlovac, koje se nalaze u slivu rijeke Dobre, te hidrološki podaci o protokama sa postaja Luke i Turkovići – Gornja Dobra, te Trošmarija, Lešće Toplice i Stative Donje – Donja Dobra. Napravljena je analiza hidroloških podataka sa gubicima duž toka Dobre. Zbog ugroženosti grada Ogulina velikim vodama provedena je, na osnovu podataka sa postaje Turkovići – Gornja Dobra, analiza velikih vodnih valova, te proračun vjerojatnosti pojave maksimalnih protoka, korištenjem teorijskih funkcija raspodjele.

2. Opće značajke slivnog područja

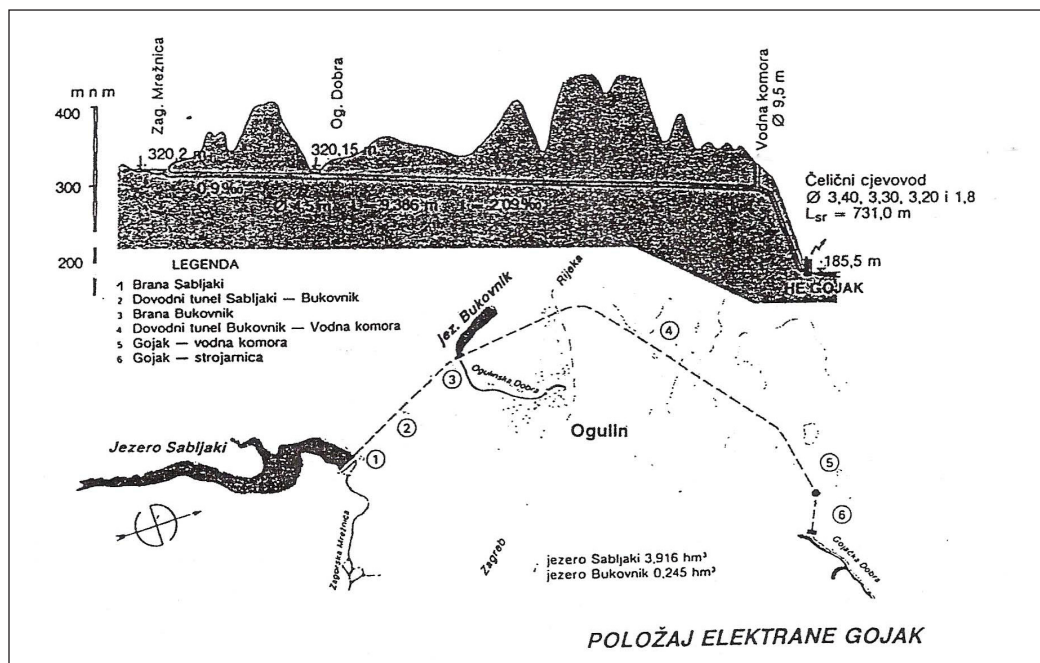
2.1. Geografski položaj

Čitavom svojom duljinom rijeka Dobra teče u Hrvatskoj, sastoji se iz Gornje Dobre (Ogulinska) i Doje Dobre (Gojačka), te je uz Koranu i Mrežnicu važna pritoka Kupe. Sliv Dobre zauzima površinu od 1094 km² (Slika 1.), od čega Primorsko – goranskoj županiji pripada oko 378 km² ili 35%. Preostali dio od 716 km² nalazi se u Karlovačkoj Županiji [2].



Slika 1. Situacijski položaj sliva Dobre

Gornja Dobra značajni je vodotok Gorskog kotara, jedine izrazito planinske regije Hrvatske, čiju glavnu karakteristiku predstavljaju brojni planinski masivi. Cijeli Gorski kotar nalazi se iznad 600 m n.m. izuzev uskih dolina gornjih tokova Kupe i Dobre. Na središnjem dijelu toka rijeke Dobre smješten je grad Ogulin, na lokaciji gdje Gornja Dobra ponire tvoreći prirodni fenomen špiljskog sustava Đulin ponor – Medvednica. Taj sustav prirodni je odvodni sustav za velike vode Gornje Dobre i njezinih pritoka. Godine 1959. izgrađena je HE Gojak, tj. brana Bukovnik, te je tako dio vode cjevovodom preusmjeren na turbine HE Gojak (Slika 2.). U razdobljima visokih vodostaja u proljeće i jesen, vode Gornje Dobre dijelom se odvođe cjevovodom prema HE Gojak, a dijelom preko brane Bukovnik u Đulin ponor.



Slika 2. Hidroenergetski sustav Gojak [2]

2.2. Klimatološke značajke

Na hidrološke značajke vodnih pojava u slivu rijeke Dobre bitan utjecaj imaju klimatološke značajke. U samom slivu i njegovoj neposrednoj blizini nalaze se dvije meteorološke postaje: Ogulin i Karlovac. Meteorološki podaci o temperaturama zraka i oborinama analizirani su za razdoblje od 1978. – 2007. godine. Postaja Karlovac (112 m n.m.) prikazuje parametre koji su karakteristični za krajnje istočni (nizinski) dio, dok parametri s postaje Ogulin (328 m n.m.) više odgovaraju zapadnom (gorskom) dijelu sliva.

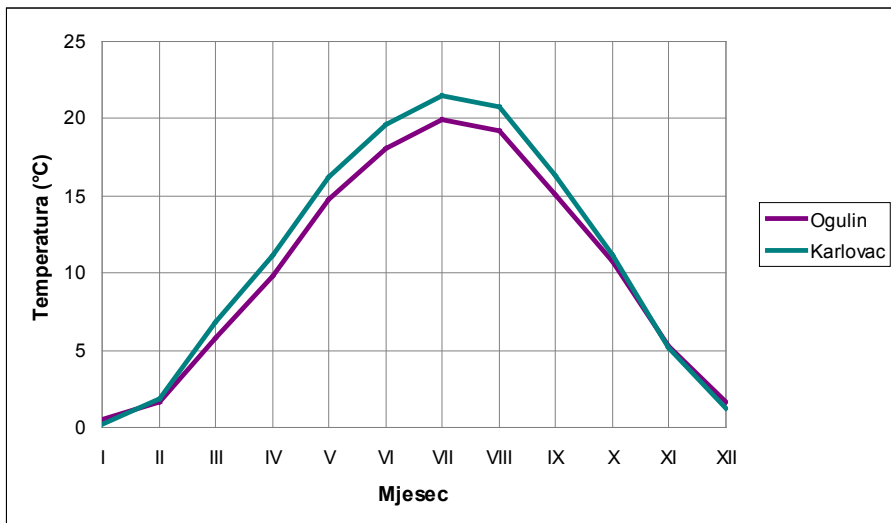
2.2.1. Temperatura zraka

Na osnovu obrađenih podataka sa meteoroloških postaja Ogulin i Karlovac može se zaključiti da je godišnji hod temperatura zraka za obje postaje približno sličan, naime srednja godišnja temperatura zraka za Ogulin iznosila je 10,2 °C, a za Karlovac 11,0 °C. Iz podataka danih u Tablici 1. vidljivo je da je najhladniji mjesec siječanj sa izmjerenom srednjom mjesečnom temperaturom zraka od 0,5 °C u Ogulinu, odnosno 0,2 °C u Karlovcu, a najtopliji srpanj s 19,9 °C u Ogulinu, odnosno 21,5 °C u Karlovcu. Amplituda srednje godišnje temperature je 3,3 °C za Ogulin, dok je za Karlovac 2,6 °C. Za obje postaje najveće amplitude zabilježene su u siječnju i veljači, a najmanje u srpnju [2].

**Tablica 1. Srednje mjesečne i godišnje temperature zraka (°C),
Ogulin i Karlovac, 1978. – 2007.**

	Mjeseci												God
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
OGULIN													
Sred.	0,5	1,6	5,8	9,8	14,8	18,1	19,9	19,2	15,1	10,7	5,3	1,7	10,2
Max	6,3	6,8	10,5	13,1	17,8	22,0	21,9	23,7	18,4	13,8	9,9	6,2	12,0
God.	2007	1990	1994	2000	2003	2003	2006	2003	1987	2001	2000	2000	2000
Min	0,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
God.	1985	1986	1987	1982	1991	1989	1978	1978	1996	1991	1978	1996	1978
Ampl.	11,4	10,7	9,7	6,7	6,9	6,2	4,2	7,0	6,2	5,4	9,1	8,8	3,3
KARLOVAC													
Sred.	0,2	1,9	6,8	11,2	16,2	19,6	21,5	20,7	16,3	11,2	5,1	1,2	11,0
Max	5,1	7,1	10,7	14,0	18,9	23,0	23,5	25,1	20,0	13,3	9,3	5,1	12,5
God.	2007	1990	1994	1983	1986	2003	1983	1992	1987	2001	2000	2000	2000
Min	-5,0	-2,8	2,5	7,8	12,7	17,6	19,7	18,4	13,2	8,5	1,6	-3,3	9,9
God.	1985	1986	1987	1997	1980	1985	1978	2005	1996	2003	1988	1998	1980
Ampl.	10,1	9,9	8,2	6,2	6,2	5,4	3,8	6,7	6,8	4,8	7,7	8,4	2,6

Slika 3. daje usporedan prikaz srednjih mjesečnih temperatura zraka za Ogulin i Karlovac, iz kojeg je vidljivo da su najveće temperaturne razlike između dviju postaja u periodu od travnja do kolovoza.



Slika 3. Srednje mjesečne temperature zraka (°C), Ogulin i Karlovac, 1978. – 2007.

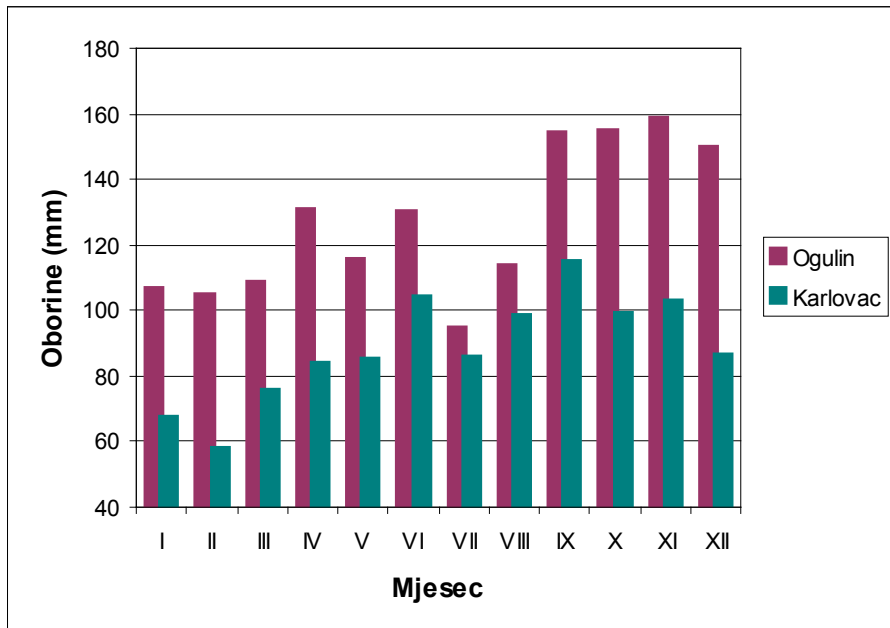
2.2.2. Oborine

U Tablici 2. prikazane su srednje mjesečne i godišnje količine oborina za postaje Ogulin i Karlovac od 1978. – 2007. godine. Za Ogulin srednja godišnja količina oborina za navedeno razdoblje iznosi 1520,4 mm, a za Karlovac 1059,1 mm. Rspored oborina unutar godine je na ovim postajama vrlo sličan. Jesenski maksimum je u rujnu, kada u prosjeku padne 154,1 mm u Ogulinu, odnosno 114,6 mm u Karlovcu. U lipnju se javlja proljetni maksimum, kada u prosjeku padne 129,8 mm u Ogulinu, odnosno 103,9 mm u Karlovcu. Najmanje oborina na području Ogulina padne u srpnju, u prosjeku 94,5 mm, dok na području Karlovca najmanje oborina padne u veljači, u prosjeku 57,7 mm. Na području Ogulina u hladnim mjesecima (od listopada do ožujka) u prosjeku padne 51%, a na području Karlovca 46% od ukupnih godišnjih količina oborina. Na temelju navedenih podataka može se zaključiti da su oborine u hladnom dijelu godine manje u Karlovcu, dok je na području Ogulina vidljiv utjecaj blizine sjevernog Jadrana na godišnju raspodjelu oborina, naime tokom hladnih mjeseci padne više oborina, što je sličnije maritimnom oborinskom režimu.

Tablica 2. Srednje mjesečne i godišnje količine oborina (mm),
Ogulin i Karlovac, 1978. – 2007.

	Mjeseci												God
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
OGULIN													
Sred.	106,7	104,6	108,3	130,6	115,5	129,8	94,5	113,7	154,1	154,4	158,6	149,6	1520,4
Max	214,2	198,0	215,2	288,0	294,0	288,8	268,8	335,2	331,3	377,2	360,3	339,8	1915,0
God.	1984	1999	2001	2002	1991	1981	1999	2006	2001	1992	1980	1981	1984
Min	1,0	8,6	20,1	12,0	10,6	54,8	17,5	4,5	41,3	16,6	14,6	46,3	1103,2
God.	1989	1993	2002	2007	1979	2002	1982	2000	1997	2006	1983	1991	1983
KARLOVAC													
Sred.	67,2	57,7	75,8	83,8	84,7	103,9	85,5	98,3	114,6	99,1	102,4	86,1	1059,1
Max	216,6	116,2	135,4	187,4	142,0	217,4	209,7	242,2	302,3	212,9	269,6	175,2	1270,6
God.	1984	1983	1978	2006	1991	1993	1999	2006	2001	1992	1980	1982	1980
Min	4,2	8,7	9,7	3,8	15,7	41,6	23,9	6,9	30,7	5,4	7,1	19,9	754,8
God.	1989	1982	2003	2007	1979	2000	2006	2000	1985	2006	1983	1989	2003

Iz podataka prikazanih na Slici 4. vidljivo je da su najveće razlike u količini oborina na ovim dvama postajama u prosincu, dok su najmanje razlike u srpnju.



Slika 4. Srednje mjesečne količine oborina (mm), Ogulin i Karlovac, 1978. – 2007.

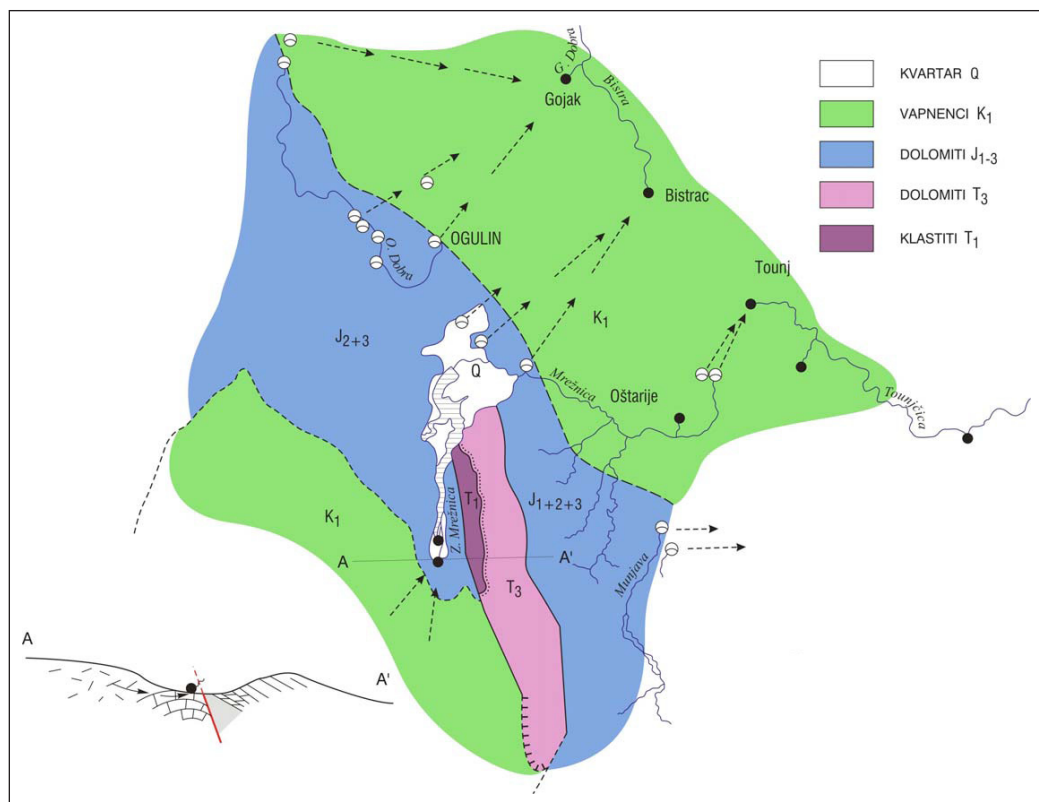
2.3. Hidrogeološke značajke

U hidrogeološkom smislu sliv rijeke Dobre predstavlja prijelazan kraj koji povezuje dinarsko i panonsko područje. Prema dubini erozije baze, odnosno dubini do koje je doprla karstifikacija, razlikujemo dvije zone: zona visokog krša – zapadno od Ogulina i zona plitkog ili fluvio krša – istočno od Ogulina. U zoni visokog krša površinska voda gubi se u podzemlju stvarajući tokove voda duboko ispod površine. Ovo područje bogato je krškim fenomenima izuzetne prirodne ljepote. Zona plitkog krša karakterizirana je manjom debljinom karbonatnih naslaga, krške pojave su relativno plitke, pa unatoč brzom poniranju voda, ne dolazi do njihova gubitka iz sliva, te su vodeni tokovi uglavnom površinski [9].

U slivu rijeke Dobre treba razlikovati tri odvojene cjeline: Ogulinska Dobra, Zagorska Mrežnica i Gojačka Dobra. Ogulinska Dobra započinje kao površinsko otjecanje s klastitima paleozojske starosti na području Skrada, a takve karakteristike zadržava do Vrbovskog. Područje Vrbovskog predstavlja izvorišnu zonu, na kontaktu propusnih i nepropusnih naslaga, gdje podzemne vode dubokog krša, koje cirkuliraju prema istoku nailaze na vodenu barijeru i ovdje formiraju neke od značajnih krških izvora (Plan navodnjavanja Karlovačke županije, 2009.). Ogulinska Dobra nastavlja teći terenom u čijoj građi sudjeluju naslage jurske starosti. Jurski sedimenti zastupljeni su uglavnom vapnencima lijaske (J_1),

dolomitiziranim vapnencima dogerske (J_2) i dolomitima malmske starosti (J_3). Dok teče dolomitima nema gubitaka voda, ali čim se tok približi vapnencima javljaju se ponori. Ogulinska Dobra konačno nestaje u Đulinom ponoru kod Ogulina na kontaktu dolomita i vapnenaca (Slika 5.) [3].

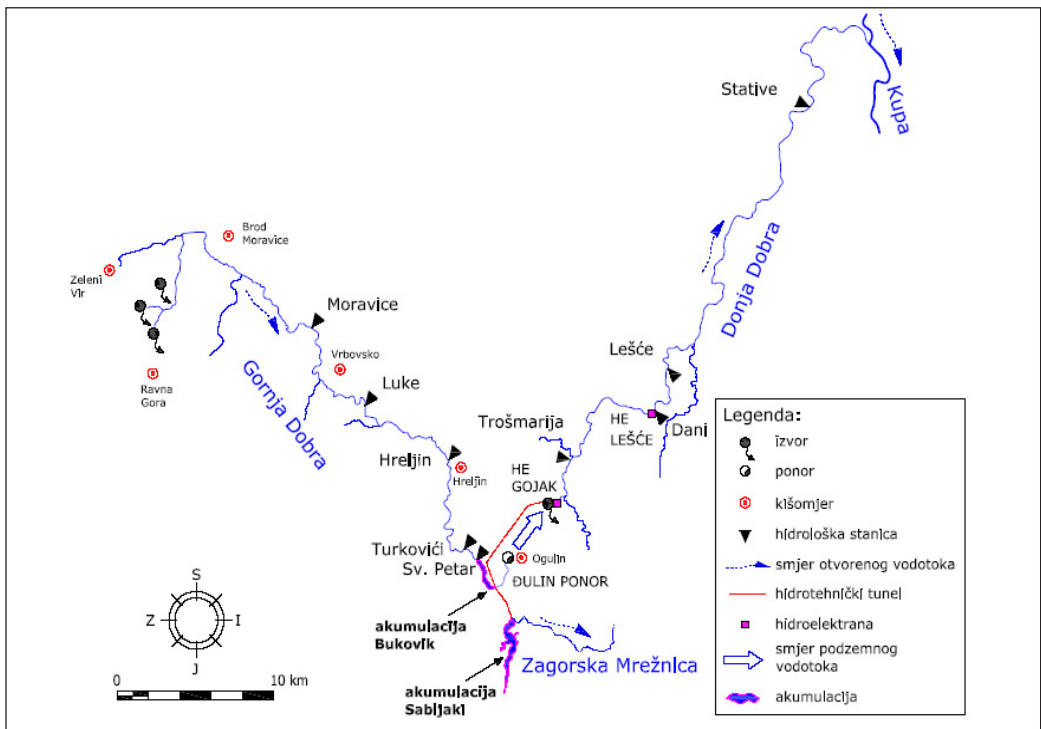
Na kontaktu trijaskih klastita i karbonatnih naslaga izvire Zagorska Mrežnica. U prirodnim uvjetima Zagorska Mrežnica prihranjuje i Gojačku Dobru i Mrežnicu, međutim zbog prevođenja vode tunelom na strojarnicu HE Gojak svrstana je u sliv rijeke Dobre. Zagorska Mrežnica kao i Ogulinska Dobra ponire na kontaktu dolomita i vapnenaca, međutim zbog izgradnje akumulacije Sabljaci, narušeni su prirodni odnosi, pa su ponori Zagorske Mrežnice gotovo suhi.



Slika 5. Pregledna geološka karta, Ogulinska Dobra – Zagorska Mrežnica [2]

Gojačka Dobra prirodni je nastavak Ogulinske Dobre nakon kraćeg toka kroz podzemlje. Koritom Gojačke Dobre otječu sve vode koje prođu strojarnicom HE Gojak, pa daljnja količina protoka ovisi o radu hidroelektrane. Sliv se bitno sužava nizvodno od Trošmarije, pa rijeka iako zadržava funkciju drena nema značajnijeg prinosa vode u tom dijelu.

Rijeka Dobra ima velike mogućnosti korištenja vode za vodoopskrbu, ali se koristi svega oko 300 l/s, što je malo u odnosu na mogućnosti, koje prelaze 2 m³/s ukupno. Tehničkim zahvatima u slivu i na tokovima može se doći do znatno većih količina. Kvaliteta vode je dobra zbog sliva u planinskom području Velike i Male Kapele. Značajniji izvori u slivu su: Izvorište Zagorske Mrežnice, Izvor Vrelo Jasenačkog potoka, Izvor Krakar (Studenac), Kaptaza u Gladima kraj Vrbovskog, Izvor Gornja Dobra (Ogulska Dobra), Donja Dobra (Gojačka Dobra), Bistrac (Slika 6.) [2].

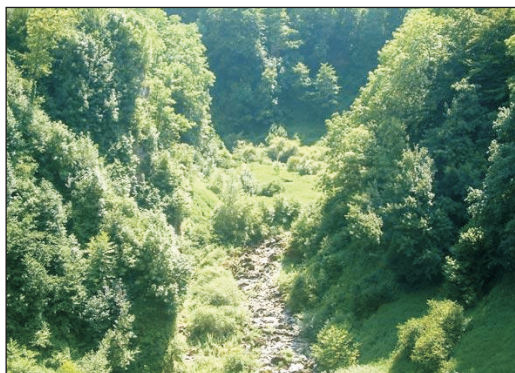


Slika 6. Vodne pojave u slivu Dobre, izvori Gornje i Donje Dobre [2]

2.4. Hidrografska mreža

Sliv rijeke Dobre zauzima površinu od 1094 km², od čega 302 km² pripada porječju Zagorske Mrežnice koji je preko akumulacije Sabljaci kod Ogulina preložen u sliv rijeke Dobre na lokaciji HE Gojak. Hidrosistem rijeke Dobre ima ukupnu duljinu od 107,9 km, a sastoji se od tri karakteristična dijela toka. Prvi poznat kao Gornja (Ogulska) Dobra, od izvora na sjeveroistočnim padinama Mlade Gore kod naselja Ravna Gora do Đulinog ponora u Ogulinu gdje ponire u podzemlje, dug je 51,2 km. Drugi, podzemni tok do Gojaka u dužini od 4,6 km, te treći dio do ušća u Kupu, pod nazivom Donja (Gojačka) Dobra, dužine oko 52,1 km.

Gornja (Ogulinska) Dobra izvire u planinskom predjelu koji čine naselja Skrad, Kupjak i Ravna Gora. Najvećim dijelom Gornja Dobra teče kanjonom kojim prolazi željeznička pruga Zagreb – Rijeka. Cijelom dužinom svoga toka prolazi kroz živopisni krajolik okružen pitomim livadama i strmim kanjonom. To je stalan vodotok koji na svom toku praktički nema izgrađenih značajnijih hidrotehničkih objekata tako da je uglavnom zadržan njezin prirodan izgled (Slike 7. i 8.). Izvedeni su samo regulacijski radovi na manjim dionicama toka kao npr. između naselja Donja Dobra i spoja Skradske i Bukovske Dobre, kao i radovi na zaštiti obala uz neke izgrađene objekte. U Gornju Dobru ulijeva se nekoliko manjih desnih pritoka od kojih su značajniji Kamačnik, Ribnjak i Vitunjčica.



Slika 7. Kanjon Gornje Dobre



*Slika 8. Gornja Dobra –
Umjetni slap u Puškarićima*

U Vrbovskom Dobra s desne strane prima potok Kamačnik. Kanjon Kamačnika duljine 3.1 km zbog svoje je privlačnosti proglašen zaštićenim krajolikom. Podno Kleka u selu Vitunj, ispod ruševina istoimenog frankopanskog grada izvire Vitunjčica koja se nakon četiri kilometra toka ulijeva u Gornju Dobru nedaleko sela Turković. Izvor Vitunjčice hidrološki je spomenik prirode. Nakon tridesetak kilometara Gornja Dobra završava s akumulacijskim jezerom Bukovnik. Od tuda vode Gornje Dobre teku pet kilometara dugim tunelom do HE Gojak, gdje nastavljaju teći tokom Donje Dobre. Višak vode iz akumulacije Bukovnik teče do Ogulina gdje ponire u Đulinom Ponoru. Nakon Đulinog ponora nastavlja svoj podzemni tok ispod grada ogulina i nakon 4,5 km ponovno izvire kod Gojaka.

U selu Gojak, devet kilometara od Ogulina vode Dobre ponovno izvire nakon podzemnog toka kroz tunel hidroelektrane ili prirodnim putem kroz špiljsko podzemlje. Od Gojaka Donja Dobra (Slike 9. i 10.) teče u pravcu sjeveroistoka prema Lešću i Karlovcu gdje nakon 52,1 km kao desna pritoka ulijeva u rijeku Kupu. Zbog velikog pad korita Donja Dobra bogata je brzacima i slapovima.

Od izvora do mosta u Trošmariji voda teče kanjonom, korito je kamenito i puno brzaca a obala prilično nepristupačna. Nizvodno od mosta na Trošmariji Dobra je na više mjesta pregrađena sedrenim naslagama i jazovima nekadašnjih mlinova. Strmi dio toka Donje Dobre, od Gojaka do sela Gorinci, biti će potopljen nakon punjenja akumulacijskog jezera HE Lešće. Značajnije pritoke Donje Dobre su Bistrac koji u Dobru utječe u blizini sela Gojak i Ribnik (Ribnjak) koji utječe ispod sela Trošmarija [8].



Slika 9. Ogoljeni kanjon Dobre



Slika 10. Umjetni slap u Protulipi kod Podumola

Bistrac je rječica koja izvire u selu Kromari, a svoje vode dobiva podzemljem od voda ogulinsko – modruške doline. Nakon 4,5 km toka završava na sastavcima s Donjom Dobrom u koju se ruši u slapu. Ribnik je potok koji izvire sjeverozapadno od Trošmarije i nakon 2,8 kilometara toka ispod tog sela utječe u Donju Dobru.

Sabljaci su akumulacijsko jezero nastalo pregradnjom riječnog toka Zagorske Mrežnice i odvodnjom njene vode tunelom do hidroelektrane Gojak, sjeverno od Ogulina. Jezero je dugo pet kilometara, a zauzima površinu od 170 hektara. U selu Sabljaci jezero završava branom.

3. Analiza hidroloških opažanja

3.1. Hidrološka mjerenja u slivu

U slivu rijeke Dobre hidrološka mjerenja vrše se od 1946. godine, te su se ona do danas vršila na pet postaja u slivu Gornje Dobre i sedam postaja u slivu Donje Dobre. Danas aktivne postaje su Turković, Luke, Moravice, Lešće Toplice, Stative Donje i Trošmarija (Tablica 3.). Na prirodni režim otjecanja u slivu rijeke Dobre, od 1959. godine, svojim radom utječe HE Gojak, koja koristi vode Gornje

Dobre i Zagorske Mrežnice. Za potrebe HE sustava Gojak Zagorska Mrežnica je zahvaćena branom kod sela Sabljaci i tvori akumulaciju Sabljaci, a Gornja Dobra je zahvaćena kod Bukovnika i tvori akumulaciju Bukovnik. Ukupni instalirani protok HE sustava Gojak kroz zatvoreni cjevovod iznosi 50 m³/s. Vode Gornje Dobre uvode se kratkim tunelom u cjevovod koji dolazi od Sabljaka.

Tablica 3. Prikaz aktivnosti hidrografskih stanica na području sliva rijeke Dobre (DHMZ)

Vodotok	Stanica	Parametri	Razdoblje obrade
Gornja Dobra	Turkovići	H	1963-2008
		Q	1963-2008
	Luke	H	1947-2008
		Q	1947-2008
		T	1964-1988, 1991-2008
	Moravice	H	1980-2008
		Q	1980-2008
	Ogulinski Hreljin	H	1947-1975
		Q	1948-1975
	Sveti Petar	H	1946-1958
	Q	1946-1958	
Donja Dobra	Lešće Toplice	H	1946-1973, 1979-2008
		Q	1946-1973, 1979-2008
	Stative Donje	H	1946-2008
		Q	1946-2008
		T	1959-1991, 1994-2008
	Trošmarija	H	1948-2008
		Q	1948-2008
		T	1964-1982
	Jarče Polje	H	1990-2008
	Dani	H	1963-1985
		Q	1963-1985
	Priselci	H	1981-2000
Trešćenje	H	1981-1992	

3.2. Usporedba i analiza međuodnosa srednjih mjesečnih i godišnjih protoka

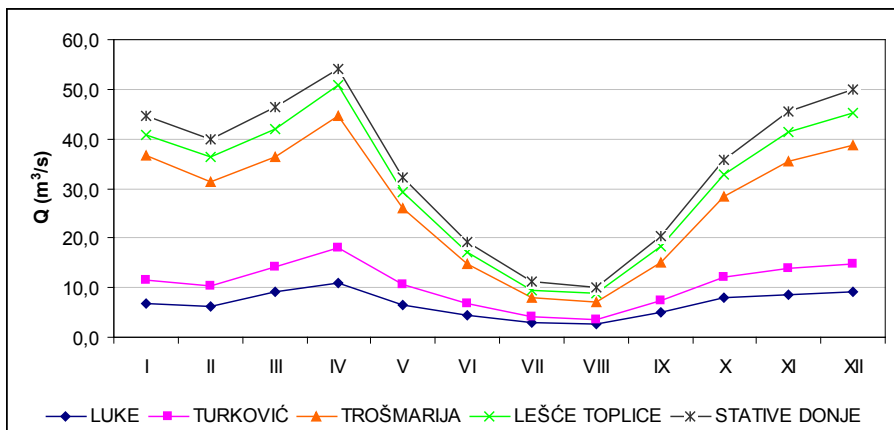
Podaci prikazani u Tablici 4. i grafički na Slici 11. daju uvid u vodni režim duž cijelog toka rijeke Dobre. Sustav HE Gojak bitno je utjecao na prirodni vodni režim Donje Dobre, što je posebno izraženo u sušnim ljetnim mjesecima.

Tablica 4. Srednje, minimalne i maksimalne mjesečne vrijednosti protoka na analiziranim postajama u slivu Dobre (1977. – 2006.) [5]

SRED.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God.
Luke	6,74	6,20	9,07	11,05	6,51	4,39	2,93	2,54	4,95	8,01	8,68	9,16	6,67
Turkovići	11,58	10,27	14,30	18,00	10,59	6,86	4,05	3,47	7,26	12,26	13,84	14,68	10,59
Trošmarija	36,68	31,48	36,28	44,78	25,91	14,78	8,06	7,07	15,12	28,30	35,45	38,68	26,88
Lešće Toplice	40,79	36,23	41,90	50,87	29,37	17,27	9,55	8,72	18,42	32,78	41,51	45,23	30,85
Stative Donje	44,60	39,95	46,28	54,11	32,13	19,25	11,19	10,01	20,35	35,70	45,55	50,05	34,10

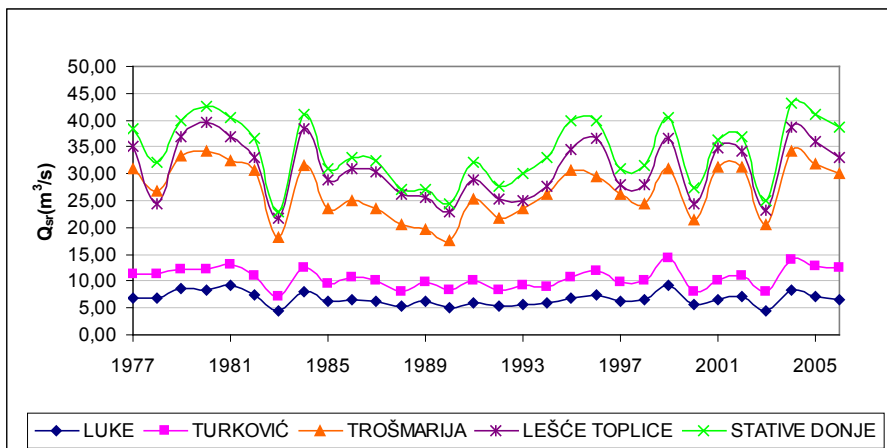
MIN.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God.
Luke	2,23	2,28	2,64	3,54	2,22	1,47	1,13	0,86	1,06	1,59	2,00	2,51	0,76
Turkovići	3,18	3,29	3,72	5,74	3,46	2,03	1,28	0,84	0,99	1,98	2,72	3,59	0,68
Trošmarija	3,69	4,86	4,97	10,99	4,37	1,53	1,42	1,23	1,29	1,53	3,68	2,32	0,95
Lešće Toplice	4,79	6,45	7,09	12,97	5,49	2,36	2,19	1,98	2,31	2,57	5,17	3,29	1,81
Stative Donje	7,68	7,80	10,15	15,06	7,10	3,52	3,14	2,81	3,16	3,62	7,25	5,66	2,46

MAX.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God.
Luke	41,87	34,53	51,42	48,83	40,38	31,66	24,22	26,49	45,67	68,62	63,25	57,06	104,94
Turkovići	59,43	49,07	64,60	63,06	53,22	41,89	29,44	30,17	56,10	81,71	79,20	72,93	126,9
Trošmarija	91,2	80,1	93,2	91,3	84,4	70,6	53,1	56,6	76,5	105,1	107,9	100,8	154,4
Lešće Toplice	104,3	92,4	105,3	105,8	96,0	78,8	60,8	66,0	88,1	119,2	123,4	119,2	173,4
Stative Donje	120,2	108,5	123,1	125,4	120,9	90,1	66,6	66,1	102,1	143,4	154,5	148,5	247,5



Slika 11. Hod srednjih mjesečnih protoka na analiziranim postajama u slivu Dobre (1977. – 2006.)

Na Slici 12. dan je prikaz srednjih godišnjih protoka na analiziranim postajama. Vidljivo je da niti na jednoj od analiziranih postaja nije prisutan značajniji terend, te da protoke na postjama Donje Dobre zbog utjecaja HE sustava Gojak variraju u većim granicama za razliku od srednjih godišnjih protoka Gornje Dobre.

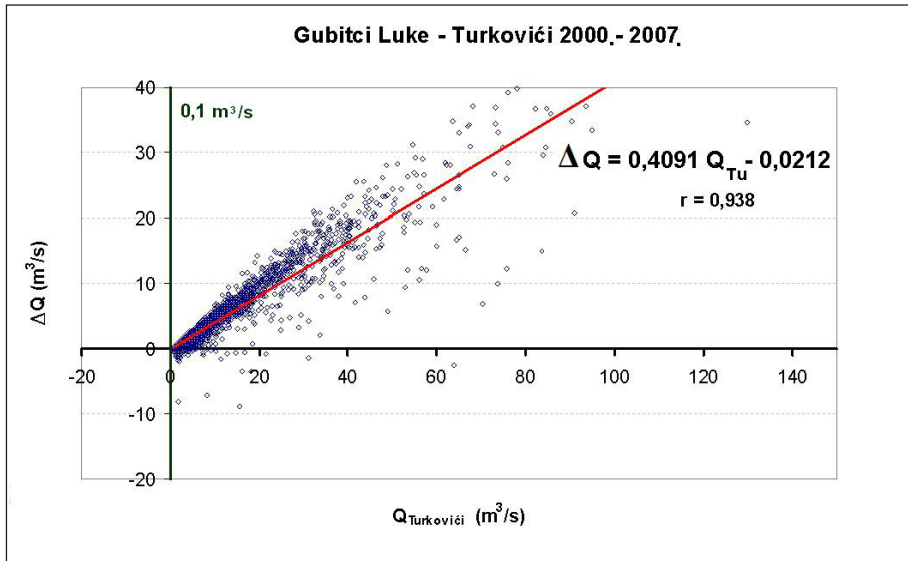


Slika 12. Hod srednjih godišnjih protoka na analiziranom postajama u slivu Dobre (1977. – 2006.)

3.3. Gubici duž toka rijeke Dobre

Pojava gubitaka vode kroz sustave pukotina, koje se nalaze na bokovima i/ili dnu korita, jedna od najčešćih karakteristika tečenja otvorenih vodotoka u kršu [5]. Takav je slučaj i sa rijekom Dobrom. Poznato je da se gubici javljaju na Donjoj Dobri na potezu između vodomjera Luke i Sveti Petar. Još 1967. i 1968. vršeni su brojni sanacijski radovi na zatvaranju tih krških pukotina s ciljem potpunog sprječavanja gubitaka vode s površine u krško podzemlje ili barem njihovo smanjivanje.

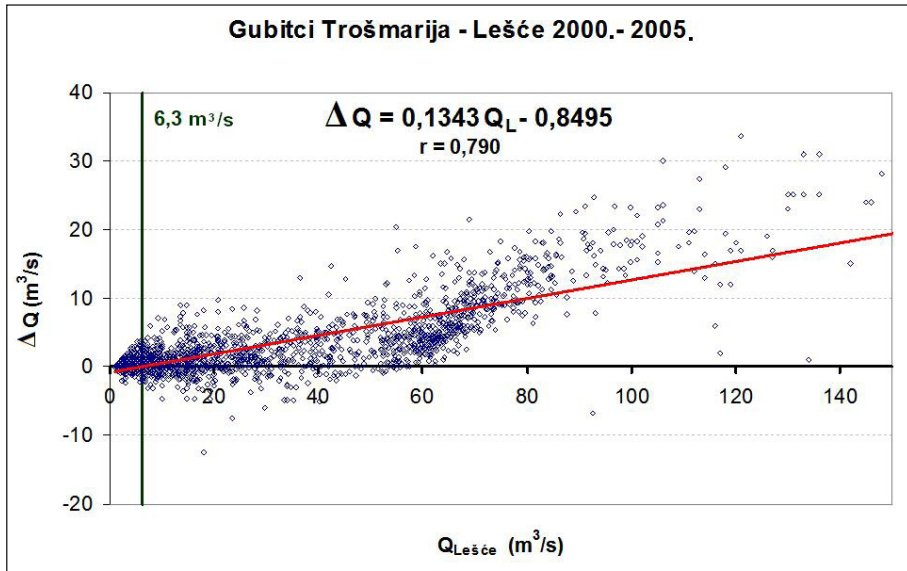
Na Slici 13. dan je grafički prikaz odnosa razlika srednjih dnevnih protoka Gornje Dobre na potezu Luke – Turkovići ΔQ (os ordinate) u funkciji protoka na profilu Turkovići $Q_{\text{Turkovići}}$ (os apscise) u osmogodišnjem razdoblju (2000. – 2007.). Uočava se da negativnih razlika, dakle gubitaka $-\Delta Q$, ima malo te da oni nisu veliki. Gubici se javljaju pri raznim protocima na profilu Turkovići, ali najčešće pri niskim protocima ispod $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Točka presjeka pravca regresije između ΔQ i $Q_{\text{Turkovići}}$ je na $Q_{\text{Turkovići}} = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (gotovo na ishodištu). Očigledno je da gubici vode iz korita Gornje Dobre na potezu Luke-Turkovići postoje, ali su oni maleni što se može povezati s mogućim utjecajem akumulacije Bukovik i Sabljaci na podizanje razine podzemnih voda Ogulinsko – Plaške zaravni [1].



Slika 13. Razlike srednjih dnevnih protoka Gornje Dobre na dionici Luke – Turkovići, (2000. – 2007.) [1]

Slika 14. daje grafički prikaz odnosa razlika srednjih dnevnih protoka Donje Dobre na potezu Trošmarija – Lešće ΔQ (os ordinate) u funkciji protoka na profilu Lešće $Q_{Lešće}$ (os apscise) u razdoblju 2000. – 2005. Uočava se da negativnih razlika, dakle gubitaka $-\Delta Q$, ima mnogo više nego na prethodno analiziranoj dionici Gornje Dobre od Luka do Trošmarija te da se oni kreću u prosjeku oko vrijednosti od $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Gubici se javljaju pri raznim protocima na profilu Lešće. Važno je uočiti da su gubici na ovoj dionici Donje Dobre bitno veći nego na prethodno analiziranoj dionici Gornje Dobre. Pri tome treba naglasiti da se na dijelu tog poteza Donje Dobre nalazi akumulacija HE Lešća. Ako su gubici vode s površine u podzemlje zaista tako veliki moglo bi se desiti da i gubici vode iz akumulacije HE Lešće budu značajni. Točka presjeka pravca regresije između ΔQ i $Q_{Lešće}$ je na $Q_{Lešće} = 6,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Bez obzira na moguće greške kod mjerenja i određivanja srednjih dnevnih protoka na oba analizirana vodomjerna profila pouzdano se može zaključiti da gubici vode iz korita Donje Dobre na potezu Trošmarija – Lešće postoje [1].

Osnovni problem kod interpretacije ovakvih vrsta mjerenja leži u činjenici što su gubici i dotoci glavninom funkcija razina podzemnih voda u okolnom krškom vodonosniku, a tek su manjim dijelom vezani s protocima u otvorenom vodotoku. Kako podataka o razinama podzemnih voda u analiziranom prostoru nema, detaljne i pouzdane zaključke nije moguće izvesti.



Slika 14. Razlike srednjih dnevnih protoka Donje Dobre na dionici Trošmarija – Lešće, (2000. – 2005.) [1]

4. Velike vode

4.1. Ugroženost Ogulina velikim vodama Gornje Dobre

U srpnju 1999. godine na sliv rijeke Dobre palo je u vrlo kratkom vremenu oko 120 mm oborina koje su rezultirale velikom poplavom u Ogulinu i okolici, te prouzročile goleme štete. Tada se u vrlo kratkom vremenu formirao vodni val s do sada nezabilježenim maksimalnim protokom, koji postojećim koritom rijeke Dobre i sustavom ponora nije mogao biti pravovremeno evakuiran. Poplavno područje procijenjeno je na 4 km², s maksimalnom kotom poplave 322,50 m n.m. (Slika 15.). Nepovoljna okolnost bila je da zahvat vode kod Bukovnika nije bio u pogonu zbog redovitog godišnjeg remonta postrojenja HE Gojak [8].

Grad Ogulin smjestio se na središnjem dijelu toka rijeke Dobre, na lokaciji gdje Gornja Dobra ponire tvoreći prirodni fenomen podzemni sustava Đula – Medvednica. Taj špiljski sustav predstavlja prirodni odvodni sustav Ogulinske Dobre i njenih pritoka. U prirodnim uvjetima, kod pojave velikih voda, dio voda evakuira se kroz podzemni sustav, a preostali dio koji se zbog ograničenog kapaciteta podzemlja ne može evakuirati, privremeno se retenira na niskim terenima uz korito rijeke. Ogulin je pod utjecajem vodnog režima na gornjem i srednjem dijelu toka, a slivna površina Gornje (Ogulinske) Dobre kod grada Ogulina iznosi ~ 300 km².



Slika 15. Poplava u Ogulinu, srpanj 1999. godine

Ogulin, odnosno njegova urbana zona, trebala bi biti zaštićena od velikih voda povratnog perioda 100 godina, odnosno trebala bi imati stupanj sigurnosti 99,9%. Izgradnjom sustava HE Gojak osigurani su uvjeti da se dio voda iz korita Ogulinske Dobre evakuira u nizvodni dio toka rijeke Dobre, te je na taj način povećan stupanj zaštite grada Ogulina od velikih voda, i osigurani uvjeti rjeđeg plavljenja depresija uz rijeku Dobru na širem području grada Ogulina. Međutim, pokazalo se da u postojećim uvjetima izgradnje nije osiguran potrebni stupanj zaštite Ogulina od velikih voda. Naime, u prosjeku se svake 2 – 3 godine dogodi velika voda koja se izliva iz Đulina ponora i plavi najniža područja, a to je najčešće od Starog grada do iza skretanja za Žegar gdje plavi državnu cestu Ogulin – Vrbovsko. Zadnje poplave dogodile su se u travnju 2001., studenom 2005., prosincu 2008. i 2009. godine [7].

Izgradnjom novih sustava kojima će se povećati evakuacijski kapacitet podzemlja, ili izgradnjom hidrotehničkih građevina na uzvodnom dijelu sliva, u svrhu redukcije vršnih protoka velikih voda, može se postići potreban stupanj

zaštite grada Ogulina. Na temelju provedenih analiza, usvojena je koncepcija zaštite grada Ogulina od velikih voda izgradnjom retencije na uzvodnom dijelu toka rijeke Dobre sjeverno od naselja Turković. U idejnom rješenju izrađenom 2001. godine analizirane su prostorne mogućnosti izgradnje retencije za obranu od poplava na razmatranoj lokaciji, dan je prijedlog tehničkih rješenja izgradnje retencijske brane i ostalih potrebnih pratećih regulacijskih građevina, te režim rada sustava.

4.2. Vjerojatnost pojave maksimalnih protoka

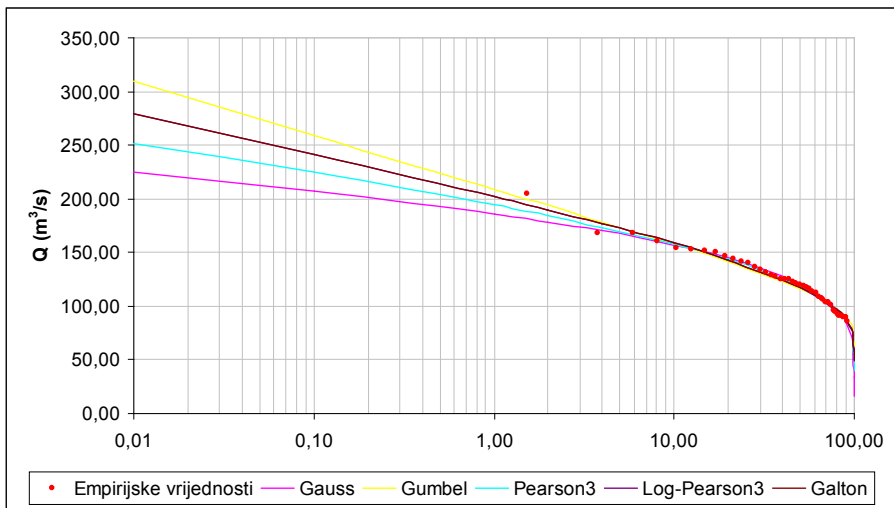
Analiza vjerojatnosti pojave maksimalnih godišnjih protoka provedena je na osnovu podataka s hidrološke postaje Turković. Postaja je smještena nizvodno od ušća Vitunjčice u Dobru, te uzvodno od Ogulina, približno na lokaciji buduće retencijske brane. Aktivna je od 1963. godine, a mjerenja vodostaja i protoka obavljaju se kontinuirano do 1993. godine, kada dolazi do nekoliko prekida u radu, pa su podaci za 1995., 1996. i 1997. godinu nepotpuni.

Proračun vjerojatnosti pojave maksimalnih godišnjih protoka provodi se prilagođavanjem standardnih teorijskih krivulja raspodjele (Gauss, Gumbel, Pearson III, Log – Pearson III i Galton) izmjerenim podacima. Raspolagali smo podacima za razdoblje od 1963. – 2007. godine. Rezultati provedene obrade prikazani su u Tablici 5. i grafički na Slici 16.

Tablica 5. Vjerojatnost pojave maksimalnih godišnjih protoka – Turkovići

pp (god.)	vjer (%)	Gauss	Gumbel	Pearson III	Log - Person III	Galton
		m_{\max} (m ³ /s)	Q_{\max} (m ³ /s)	Q_{\max} (m ³ /s)	Q_{\max} (m ³ /s)	Q_{\max} (m ³ /s)
10000	0,01	225,29	309,99	251,63	279,31	278,99
1000	0,10	207,75	259,65	224,59	241,37	241,37
100	1,00	186,32	209,10	194,71	202,39	202,20
50	2,00	178,69	194,00	184,72	189,23	189,85
25	4,00	170,21	178,46	173,72	176,93	177,01
10	10,00	157,00	157,67	158,12	158,67	158,71
5	20,00	144,68	141,26	144,01	143,29	143,35
2	50,00	121,06	116,53	118,25	117,94	117,94
1,25	80,00	97,43	97,92	95,80	95,73	97,03
1,1111	90,00	85,11	90,26	87,39	87,26	87,64
1,0417	96,00	71,90	83,26	78,97	79,53	78,58
1,0202	98,02	63,43	78,88	73,36	72,49	73,27
1,0101	99,00	55,79	74,94	65,22	69,21	68,79
1,0010	99,90	34,36	65,97	51,47	57,50	57,63
1,0001	99,99	16,82	60,28	40,81	50,03	49,86

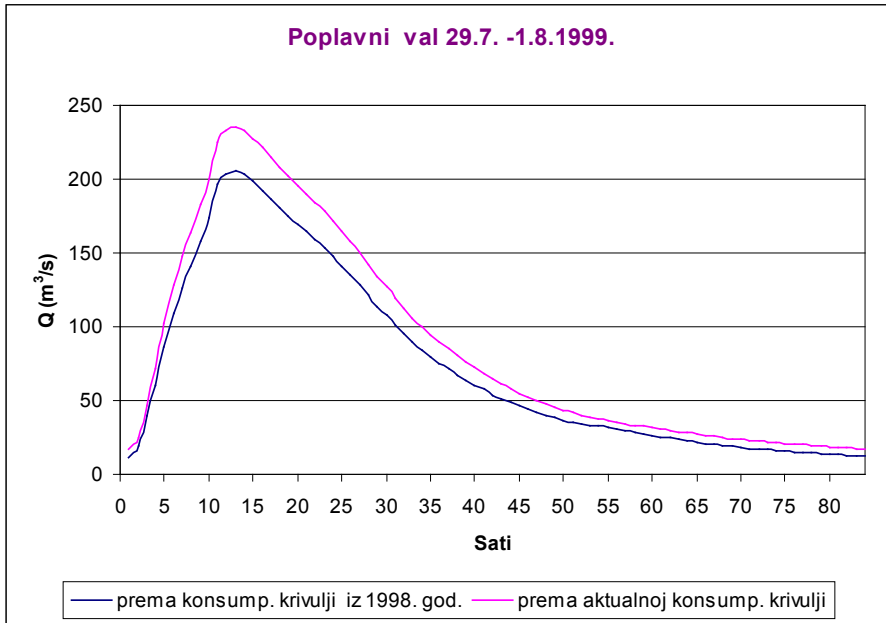
Katastrofalna poplava grada Ogulina, koja se dogodila krajem srpnja 1999. godine, na postaji Turkovići je prema izmjerenom maksimalnom vodostaju od 357 cm, imala vršni protok od 205,5 m³/s. Iz grafičkog prikaza na Slici 16. vidljivo je da se u domeni protoka iznad 150 m³/s, a posebno iznad 200 m³/s najbolje prilagodila Gumbelova funkcija raspodjele. Po toj distribuciji maksimalni protok 100 godišnje pojave iznosi 209,10 m³/s., što je nešto više od zabilježenog maksimalnog protoka 1999. godine., stoga je Gumbelova raspodjela odabrana kao mjerodavna, jer grad Ogulin, odnosno njegova urbana zona, treba biti zaštićena od velikih voda 100 godišnjeg povratnog perioda.



Slika 16. Vjerojatnost pojave maksimalnih godišnjih protoka – Turkovići

4.3. Analiza velikih vodnih valova

Za analizu problema velikih voda grada Ogulina provedena je obrada podataka s hidrološke postaje Turkovići, te je usvojen oblik vodnog vala identičan obliku vodnog vala izmjenenog za vrijeme povodnja iz srpnja 1999. godine (Slika 17.). Ovako konstruiran hidrogram velikih voda realnije prezentira ponašanje – djelovanje uzvodnog sliva rijeke Dobre u velikovodnim situacijama.



Slika 17. Poplavni val iz 1999. godine prema razmatranim konsumpcijskim odnosima

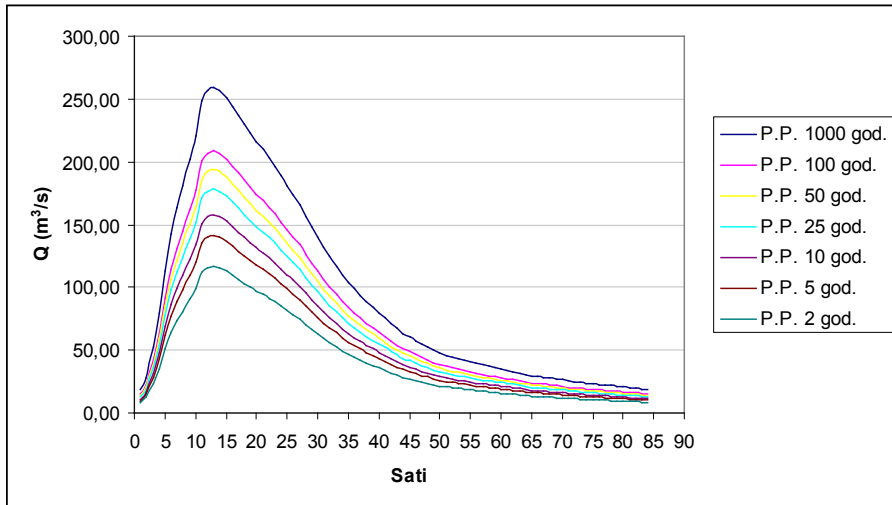
Za potrebe analize velikih vodnih valova različitih povratnih perioda, usvojen je aktualni konsumpcijski odnos koji u domeni visokih vodostaja daje veće protoke, što je na strani veće sigurnosti. U skladu s tim vodni valovi konstruirani su množenjem ordinate poplavnog vala iz 1999. godine s redukcijskim koeficijentom. Spomenuti je koeficijent dobiven tako da je usvojena mjerodavna maksimalna 100-god. protoka (Gumbelova distribucija) podijeljena sa protokom dobivenom preko aktualne konsumpcijske krivulje odnosno, $209,10 / 235,13 = 0,89$. Isti pristup korišten je za konstrukciju hidrograma velikih voda ostalih povratnih perioda (Slika 18.), a ostali redukcijski koeficijenti prikazani su u Tablici 6.

Tablica 6. Redukcijski koeficijenti

P.P. God.		1000	100	50	25	10	5	2
Q _{max} (m ³ /s)	Gumbelova distribucija	259,65	209,10	194,00	178,46	157,67	141,26	116,53
	Aktualna konsum. krivulja	235,13						
Redukcijski koeficijent		1,10	0,89	0,83	0,76	0,67	0,60	0,50

Valovi prikazani na Slici 18. konstruirani su na osnovu aktualne konsumpcije krivulje DHMZ-a. Iako je broj vodomjerenja relativno velik (u razdoblju od 1963.

– 2009. izvršeno je ukupno 154 mjerenja) vodostaji iznad 200 cm zabilježeni su samo pet puta, te su na razini 1 godišnjih velikih voda. Kako aktualna konsumpcijska krivulja ne može biti osnov za proračun mjerodavne 100 godišnje velike vode, za potrebe dimenzioniranja zaštitnih hidrotehničkih građevina potrebno je osigurati realne konsumpcijske odnose, koji će biti zasnovani na mjerenjima izvršenim u nepovoljnijim vodnorežimskim situacijama [5].



Slika 18. Vodni valovi različitih povratnih perioda

5. Zaključak

U ovom radu analizirana je osnovna hidrologija sliva rijeke Dobre. Analiza je provedena klasičnim metodama obrade, na osnovu raspoloživih hidroloških i meteoroloških podataka s postaja koje djeluju u slivu rijeke Dobre. Obradeni podaci o oborinama pokazali su da u mjesecu srpnju padne u prosjeku vrlo malo kiše iako se katastrofalna poplava iz 1999. godine dogodila upravo u srpnju.

Sliv Dobre ima značajne vodne resurse kako površinske tako i podzemne, te bi se tehnički.m zahvatima u slivu i na tokovima moglo doći do znatno većih količina vode za vodoopskrbu. Velika vodnost Dobre bila je presudna da se krajem pedesetih godina prošlog stoljeća izgradi HE Gojak, a prema planskoj dokumentaciji, na ukupnom toku, planira se izvesti ukupno pet elektrana. U izgradnji je HE sustav Lešće, a od drugih hidrotehničkih građevina planira se izgradnja retencije za obranu grada Ogulina od velikih voda kod naselja Turkovići.

Karakteristike vodnog režima rijeke Dobre su izrazita bujičnost s naglim i velikim varijacijama protoka. To je i glavni uzrok ugrožavanja poplavama naseljenih područja u dolini Dobre, a posebno grada Ogulina.

Proračun velikih voda proveden je na osnovu aktualne konsumpcijske krivulje DHMZ-a za postaju Turkovići. Pokazalo se da aktualna konsumpcijska krivulja nije najbolja za proračun mjerodavnih velikih voda za potrebe dimenzioniranja zaštitnih hidrotehničkih građevina. Analiza gubitaka pokazala je da gubici vode iz korita Donje Dobre na potezu Trošmarija – Lešće postoje. Kako su dotoci i gubici glavninom funkcija razina podzemnih voda, biti će potrebno pored podloga iz ovog rada provesti i obradu podzemnih voda kako bi se dobila detaljna hidrološka podloga neophodna za planiranje budućih hidrotehničkih objekata.

6. Literatura

- [1] Bonacci O., Andrić I.: *Hidrološka analiza krške rijeke Dobre*, Hrvatske vode (u postupku prihvaćanja), Zagreb, 2010.
- [2] Institut IGH d.d. IGH Projekt, Zavod za hidrotehničko projektiranje: *Plan navodnjavanja Karlovačke županije*, Zagreb, 2009.
- [3] Juračić M.: *Predavanja za ak. godinu 2008/2009.*, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geološki odsjek, 2008.
- [4] Nadilo B.: *HE Lešće – Prva hidroelektrana u samostalnoj Hrvatskoj*, Građevinar, Hrvatski savez građevinskih inženjera, Zagreb, prosinac 2007.
- [5] Opala I.: *Hidrološka analiza sliva rijeke Dobre*, Diplomski rad, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, 2010.
- [6] Vedrina B., Stepinac D.: *Dobra nije uvijek dobra*, Hrvatska Vodoprivreda, Hrvatske vode, Zagreb, siječanj/veljača 2009.
- [7] Vodoprivredno-projektne biro d.d.: *Zaštita grada Ogulina od velikih voda: Knjiga 1 – Hidrološke obrade*, Zagreb, 2001.
- [8] Vodoprivredno – projektne biro d.d.: *Stručna podloga za izradu SUO retencije Ogulin, Hidrološko-hidraulički proračuni*, Zagreb, 2005.
- [9] Županijski zavod za razvoj, prostorno uređenje i zaštitu okoliša: *Prostorni plan Primorsko-goranske županije*, Rijeka, 2000.

Hidrologija sliva Dubračine

Hydrology of Dubračina River Catchment Area

Andrija Rubinić, Nevenka Ožanić

Sažetak. Na području sliva Dubračine provedena je hidrološka analiza vodnih pojava. Analiza je provedena na način da su uz standardne hidrološke metode korištene i obrade prostornih podloga uporabom GIS-tehnologije.

Dubračina je glavni vodotok kojim otječu vode središnjeg dijela Vinodolske doline, a u more se ulijeva u Crikvenici. Sliv ima posebne prirodne i kulturne vrijednosti, pa veliki dio sliva čini područje obuhvaćeno Prostornim planom područja posebnih obilježja Vinodolske doline. U slivu se nalazi i najveće aktivno klizište u Hrvatskoj (Slani potok), pa je to područje na kome je upravo ove godine započela priprema za realizaciju međunarodnog hrvatsko-japanskog projekta Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje nepogoda kod odrona zemlje i poplava u Hrvatskoj. Ovaj je rad mali uvodni dio u hidrološku problematiku analiziranog područja.

Na hidrologiju u slivu Dubračine velik utjecaj imaju hidroelektrana Vinodol i akumulacija Donji bazen, koje su promijenile prirodni režim otjecanja na velikom dijelu sliva iz razloga što se u sliv Dubračine objektima HE dovode vode s područja Gorskog kotara (iz sliva Ličanke i Lokvarke). U radu su analizirani i raspoloživi meteorološki podaci sa meteorološke postaje Crikvenica. Njen je rad značajan zbog raspoloživog niza podataka o oborinama i temperaturama zraka duljeg od 100 godina, po čemu je to stanica s najduljim nizom mjerenja na hrvatskoj obali. U ovom radu također su analizirana mjerenja i s hidroloških stanica u slivu. Danas se aktivne stanice nalaze na vodotoku Dubračina, to su Kučani, Most Tribalj i Crikvenica, stanica HE Tribalj koja prati rad hidroelektrane Vinodol.

Ključne riječi: hidrologija krša, sliv Dubračine, HE Vinodol, bujični pritoci, maksimalni protoci

Abstract. In the Dubračina catchment area an analysis of hydrologic phenomena was conducted. The analysis was conducted in a way that the GIS-technology processed spatial bases were used in addition to the standard hydrologic methods.

The Dubračina river is the main watercourse through which the waters of the central part of the Vinodol valley are drained and flows into sea at Crikvenica. The basin has special natural and cultural values, and a large part of the basin makes up the area covered by the spatial plan areas with special characteristics of the Vinodol valley. The basin contains the largest active landslide in Croatia (Salt creek), so it is the area where just this year a preparation for the implementation of the international Croatian-Japanese Project Risk Identification and land use planning to mitigate natural disasters by landslides and floods in Croatia began. This paper makes a small inaugural part into the hydrological side of the study area.

The Vinodol hydraulic power plant and the lower pool reservoir have a major impact on the hydrology of the Dubračina in the basin, which changed the natural runoff regime in a large part of the basin, because of the Dubračina basin intake from the area of Gorski Kotar (from the basin of the Ličanka and Lokvarka). The paper analyses the available meteorological data from the Crikvenica weather station. Its work is notable because of the available data series of precipitation and air temperature of more than 100 years, making this station the station with the longest series of measurements on the Croatian coast. The paper also analyses the measurements of the hydrological stations in the basin. Nowadays, the active stations are located in the watercourse of Dubračina. These are Kučani, Tribalj bridge and Crikvenica, and also the Tribalj station that monitors the production of electricity at the Vinodol power plant.

Key words: karst hydrology, Dubračina catchment area, HP Vinodol, torrential tributaries, maximal discharge.

1. Uvod

Dubračina je glavni vodotok kojim otječu vode središnjeg dijela Vinodolske doline, a u more se ulijeva u Crikvenici. Sliv ima posebne prirodne i kulturne vrijednosti, pa veliki dio sliva čini područje obuhvaćeno *Prostornim planom područja posebnih obilježja Vinodolske doline* [11]. Analizirano područje sliva Dubračine nalazi se u središnjem dijelu Vinodolske doline, koja je izdvojena geografska cjelina istočnog kvarnerskog prostora. U geografskom smislu Vinodol je jedinstvena prostorna cjelina između Križišća na sjeverozapadu i Novog Vinodolskog na jugoistoku te primorja uz Vinodolski kanal (Slika 1.).

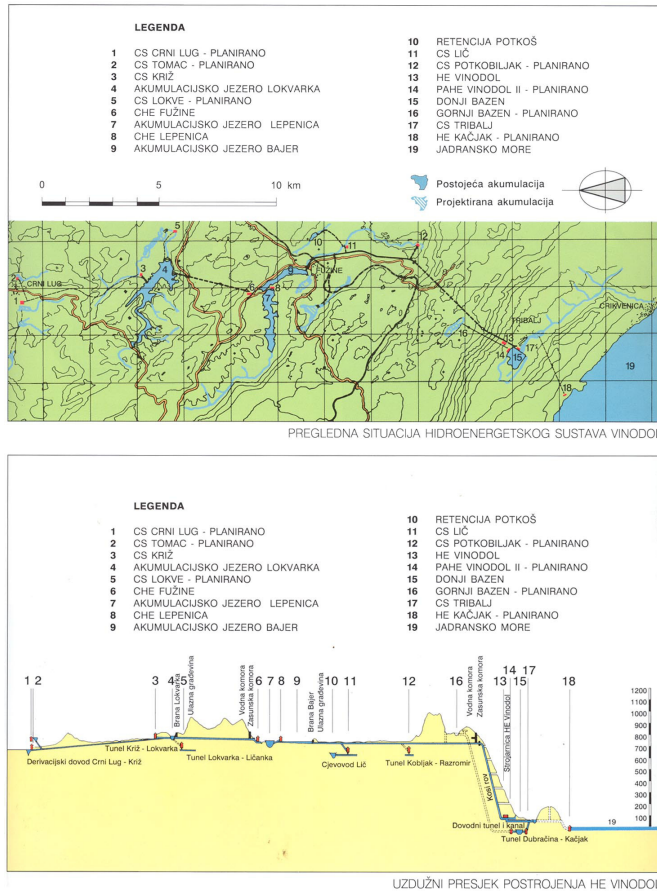


Slika 1. Situacijski položaj sliva Dubračine

Vodotok Dubračina je svojom neposrednom površinom sliva i vodnom bilancom najveći i najznačajniji vodotok Vinodolske doline (Slika 1). Značajan utjecaj na sam vodotok sa hidrološkog stajališta ima hidroenergetski sustav Vinodol sa maksimalnim kapacitetom od $16,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Taj sustav obuhvaća gorskokotarske vodotoke Ličanku, Lokvarku, Križ potok, Potkoš, Benkovac i Potok pod grobljem. Ukupna površina sliva ovog sustava iznosi oko $80,8 \text{ km}^2$, a cijela se površina nalazi na nadmorskoj visini od 700 do 1100 m. Srednje godišnje oborine na tom prostoru kreću se od 1420 do 3950 mm što daje prosječni godišnji protok od $4,21 \text{ m}^3/\text{s}$. Energetski potencijal ovih vodotoka uglavnom se koristi na HE Vinodol, smještenoj u Vinodolskoj dolini na 56,5 m n.m.

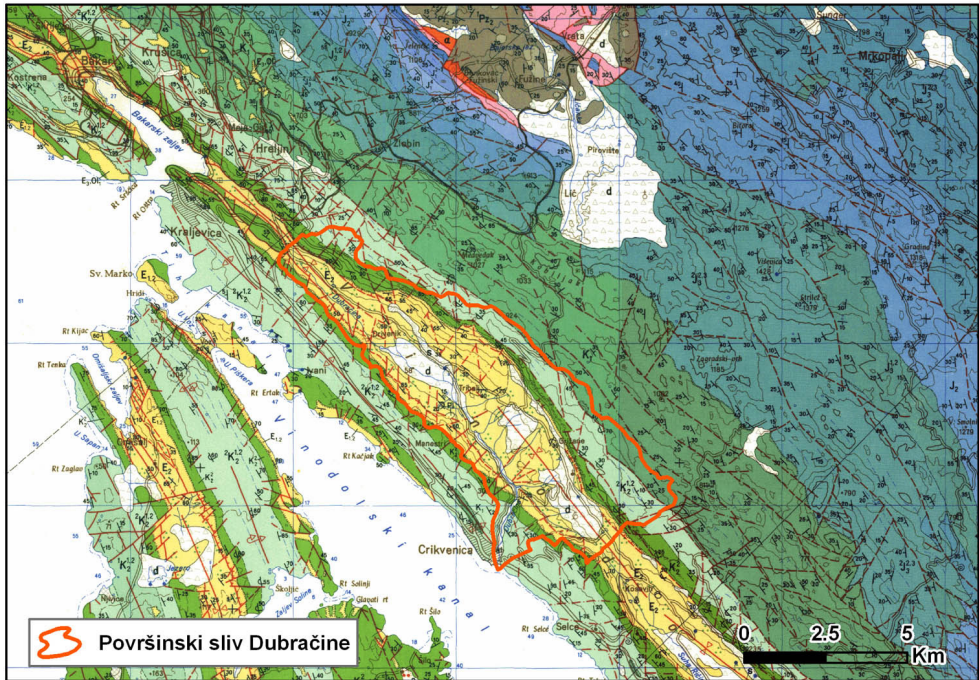
Osnovna koncepcija tehničkog rješenja ovog sustava temelji se na zahvaćanju voda rijeke Lokvarke u akumulacijskom jezeru Lokvarka i voda rijeke Ličanke u akumulacijskom jezeru Bajer, te njihovog spojnog tunela i derivacijskog dovoda od jezera Bajer do HE Vinodol. Nakon puštanja u pogon HE Vinodol 1952. god., nastavilo se s izgradnjom ovog sustava 1955. g. izgradnjom CS Lič uključuju se vode Lič polja i potoka Potkoš, 1956. g. izgradnjom CS Križ uključuju se vode potoka Križ, a 1975. g. izgrađena je akumulacija na potoku Potkoš. Godine 1976. nadvisuje se preljev na brani Lokvarki, a 1987. izgrađena je nova akumulacija Lepenica sa crpnom hidroelektranom radi povećanja akumulacijskog prostora u slivu Ličanke. Postojali su planovi za daljnje proširenje sustava, tako da je

početkom osamdesetih godina prošlog stoljeća izgrađena akumulacija Donji bazen na Dubračini u neposrednoj blizini HE Vinodol na kojoj se planira reverzibilna hidroelektrana sa još neizgrađenom akumulacijom Gornji bazen na koti 820 m n.m., te još neki objekti uz manje akumulacije u Gorskom kotaru (Slika 2.). Akumulacija Donji bazen danas se koristi za opskrbu Petrokemije u Omišlju, a odnedavno i INA-e u Urinju, tehnološkim vodama, te za redukciju velikih vodnih valova Dubračine [3].



Slika 2. Prikaz izgrađenog i planiranog sustava HE Vinodol (Elektroprojekt, 2000)

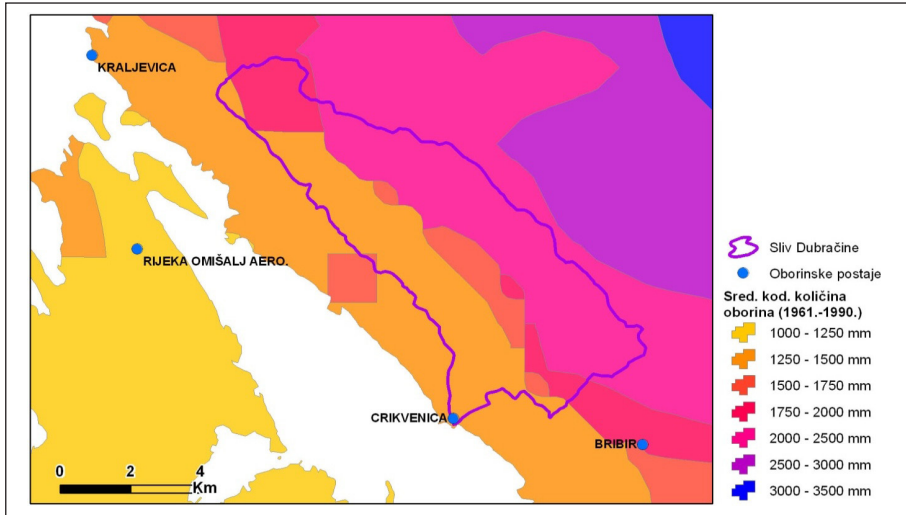
Geološka građa područja Vinodolske doline vrlo je složena (Slika 3.). Sama je dolina krajnji jugoistočni dio veće morfološke cjeline koju osim te doline, tvore dolina Rječine, dolina Sušačke drage i depresija Bakarskog zaljeva. Ima nepravilan eliptičan oblik najveće duljine do 23 km i širine do 4 km. Sa sjeveroistočne strane Vinodolska dolina oštro je odvojena strmim padinama, čiji vrhovi mjestimice premašuju nadmorsku visinu od 700 m [1].



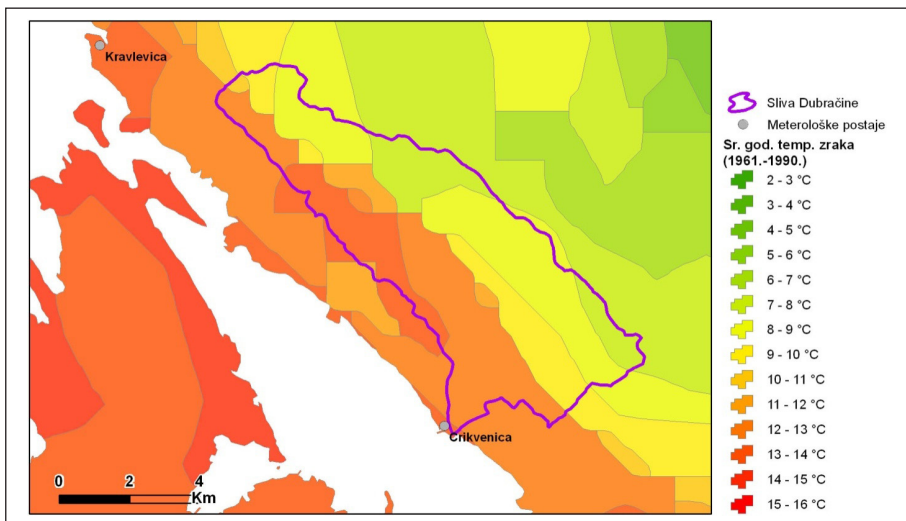
Slika 3. Dio geološke karte s ucrtanim površinskim slivom Dubračine – pripravljeno prema OGK Mj. 1:100.000 (Grimani i drugi, 1963)

Današnji oblik Vinodolske doline posljedica je morfološke evolucije terena. Na reljef su presudno utjecali tektonski pokreti tijekom posljednjih trideset milijuna godina. U području Vinodolske doline nalaze se litološki vrlo različite naslage. Naslage krednog i paleogenskog perioda su litificirane pa tvore sedimentne stijene karbonatnog i klastičnog tipa. Mlađe pliocenske i kvartarne naslage su djelomični ili potpuni pokrivač na starijim stijenama. U slivu se nalazi i najveće aktivno klizište u Hrvatskoj (Slani potok), pa je to područje na kome je upravo ove godine započela priprema za realizaciju Međunarodnog hrvatsko-japanskog projekta - Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje nepogoda kod odrona zemlje i poplava u Hrvatskoj.

Na samom se slivnom području kao i u njegovoj neposrednoj blizini nalazi samo klimatološka postaja Crikvenica, osnovana još 1891. godine, te oborinske postaje Bribir i Hreljin. Za referentno 30-godišnje razdoblje od 1961.-90., Državni je hidrometeorološki zavod (2002) proveo na razini Hrvatske i analizu prostornog rasporeda srednjih godišnjih temperatura zraka. Na osnovu te je obrade u dokumentu Hrvatskih voda VGO Rijeka (2004) napravljen i detaljniji prikaz spomenutih prostornih značajki oborina i temperatura zraka širega analiziranog prostora (Slike 4. i 5.)

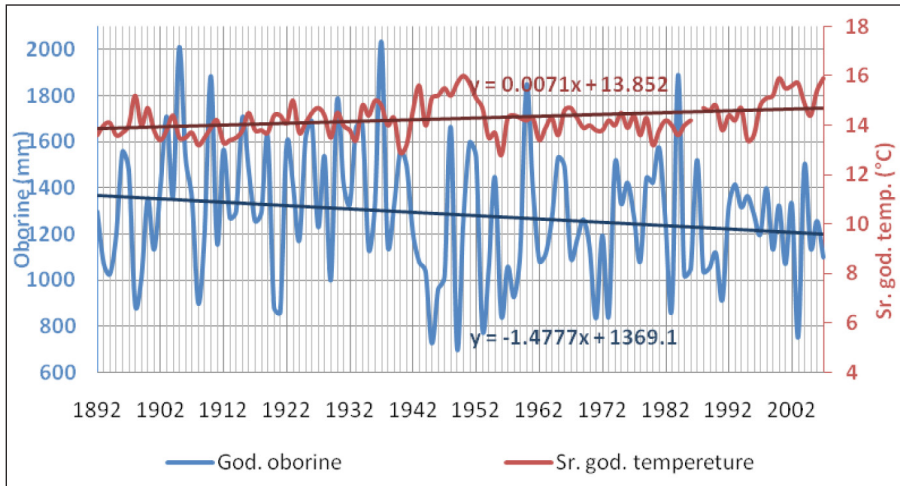


Slika 4. Prikaz srednjih godišnjih temperatura zraka (1961.-1990.) prema HV VGO Rijeka (2004)



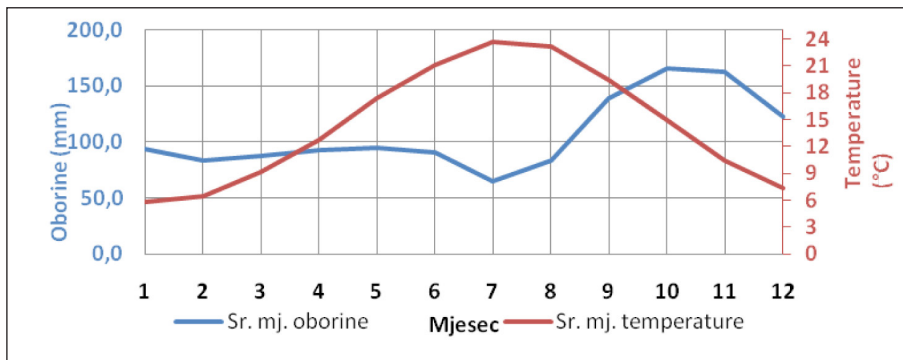
Slika 5. Prikaz srednjih godišnjih oborina (1961.-1990.) prema HV VGO Rijeka (2004)

Hod srednjih godišnjih oborina [2] i temperatura zraka dan je na Slici 6. Vidljivo je da srednje godišnje temperature zraka imaju trend povećanja od $0.007\text{ }^{\circ}\text{C/god}$, a oborine trend smanjenja od 1.48 mm/god . Trendovi su posebno naglašeni tijekom posljednjih 20-tak godina.



Slika 6. Hod srednjih godišnjih temperatura zraka i god. količina oborina za postaju Crikvenica (1892. – 2007.)

Godišnja raspodjela srednjih mjesečnih temperatura i oborina dana je na Slici 7. U prosjeku, najniže godišnje temperatura zraka javljaju u siječnju, a najviše u srpnju. Hod oborina pokazuje postojanje dvaju oborinskih maksimuma – u listopadu i svibnju, od kojih je naglašeniji u listopadu. Oborinski minimum javlja se u prosjeku u srpnju [9].



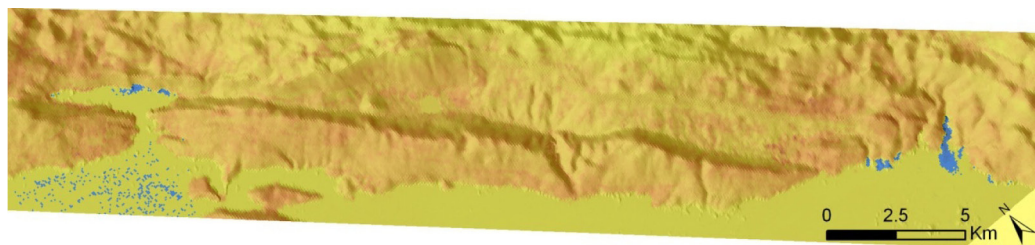
Slika 7. Godišnji hod srednjih mjesečnih temperatura zraka i oborina za postaju Crikvenica (1892. – 2007.).

Na području sliva Dubračine osim glavnog toka Dubračine nalazi se i više izraženih bujičnih tokova u zapadnom dijelu sliva, brojni izvori, kao i akumulacija Donji bazen kao dio sustava HE Vinodol (Slika 8.). Izvori su manje izdašnosti te periodički presušuju u sušnim razdobljima, većina ih se nalazi na kontaktu dobro

propusnih karbonatnih stijena i nepropusnih fliških sedimenata. Jedini izvor s većom izdašnošću je Sušik koji se nalazi sjeveroistočno od Triblja ispod sela V. Sušik, a dobiva vodu iz dubljih dijelova krškog vodonosnika.



Slika 8. Vodne pojave na području i u okolici sliva Dubračine



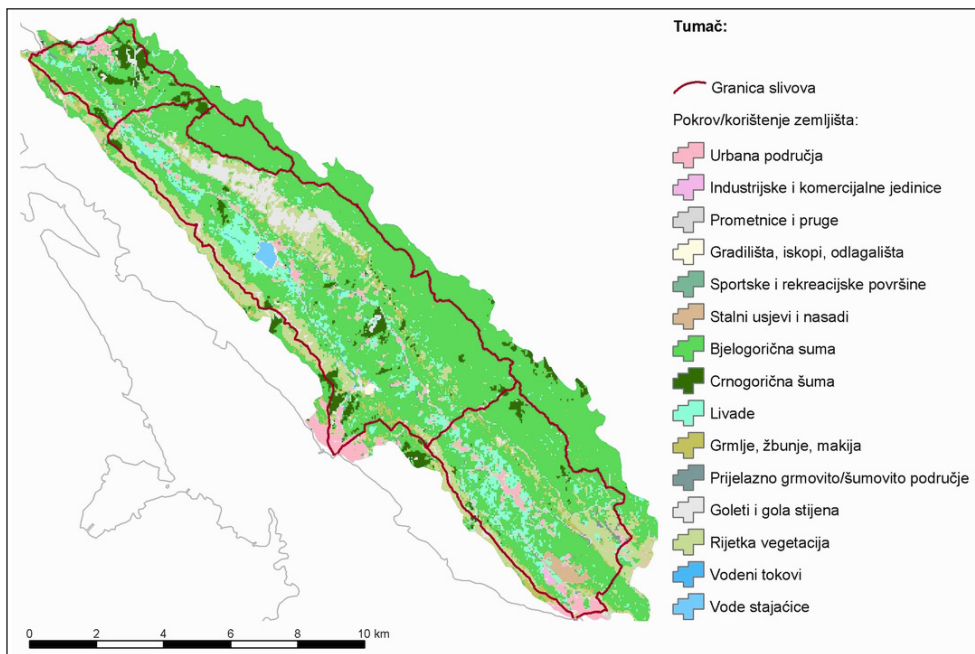
Slika 9. Termalna infracrvena termalna snimka ETM+ na od 6.6.2000. s interpoliranim reljefom terena na kojoj se vidi istjecanje priobalnih izvora i vrulja na krajevima Vinodolske doline

Zbog svoga usjedanja u okolni teren, Vinodolski rov usmjerio je kretanje podzemnih voda koje na analizirani prostor dotječu iz krškog zaleđa. Zato je istjecanje većih količina podzemnih uočljivo na krajevima Vinodolske doline

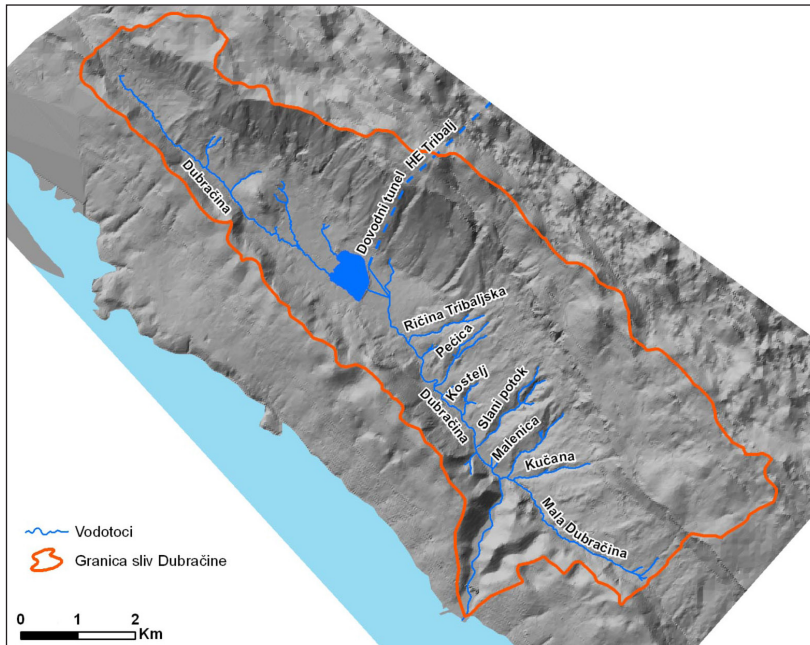
putem priobalnih izvora i vrulja. Uzrok ove pojave dijelom je debeli nepropusni sediment u dnu doline koji predstavlja branu u tečenju podzemne vode iz smjera zaleđa prema moru, pa se istjecanje događa na njenim rubovima. Takva su istjecanja, zbog različite temperature podzemnih voda i mora, najuočljivija na infracrvenim termalnim satelitskim snimkama (Slika 9.).

Pokrov/korištenje zemljišta na području Vinodolske doline (Slika 10.) dobiven je analizom i interpretacijom satelitskog snimka (Landsat ETM) [5]. Duž cijele doline, u njenim nižim dijelovima gdje su i nagibi terena blagi do umjereni, prevladavajuća vegetacija su livade uz gustu i nisku bjelogoričnu šumu. Porastom nagiba terena postupno se mijenja i vegetacija pa se tako mjestimično pojavljuje i crnogorična šuma, uglavnom na lokacijama čija je orijentacija uglavnom prema sjeveru, sjeveroistoku te istoku. Na južnim, jugoistočnim, te jugozapadnim padinama koje su ujedno klasificirane kao strme i vrlo strme, vegetacija je daleko oskudnija pa se tako umjesto grmlja i drugog niskog raslinja javljaju površine s rijetkom vegetacijom dok je na rubovima doline omeđene vrhovima litica, kao i na strmim padinama orijentiranim prema jugu vegetacija vrlo oskudna ili je uopće nema [8].

U samoj su dolini locirana i brojna manja naselja te osamljena domaćinstva uz minimalnu poljoprivrednu proizvodnju, uglavnom za vlastite potrebe. Izgrađenost doline vidljiva je i u izgrađenosti prometne mreže Vinodolske doline koja dobro povezuje analizirano područje s obalnim pojasom.



Slika 10. Pokrov/korištenje zemljišta Vinodolske doline (Hrvatske vode, 2004b)



Slika 11. Hidrografska mreža u slivu Dubračine, sa nazivljem prema kartama 1:5000

S obzirom na geološku građu te slabije propusne naslage u nizinskom dijelu sliva razvijena je mreža površinskih vodotoka. Njihova je karakteristika presušivanje u sušnom dijelu godine, a neki od njih izrazitog su bujičnog karaktera (Slika 11.).

Glavni vodotok Dubračina može se podijeliti na umjetno stvorena dva dijela, odnosno gornji dio toka i donji, koje dijeli akumulacija Donji bazen (Slika 12. i 13.).



Slika 12. Pogled na akumulaciju Donji bazen



Slika 13. Pogled na donji dio sliva

Gornji dio karakterizira učestalo presušivanje i većinom prirodno stanje - neregulirano korito ili samo obzidano sa starim suhozidima, koje je na dijelovima jako zaraslo u grmlje i šikaru (Slike 14. - 15.). Duljina ovog dijela korita prema je oko 4.9 km, nakon čega se ulijeva u akumulaciju Donji bazen, a karakterizira ga relativno blagi pad korita. Radi se o području čiji dijelovi imaju karakter vlažnih livada, močvarnih i poplavnih šumaraka, koje je zbog svoje rijetkosti potrebno adekvatno štititi [11].



Slika 14. Dubračina nizvodno od mosta u Kučanima



Slika 15. Dubračina u zaseoku Cerovići

Donji dio toka nastavlja se ispod akumulacije Donji bazen te se u njega većim dijelom neposredno ispod akumulacije ulijevaju vode iz sustava HE Vinodol, kao i vode iz izvorišta Sušik. Korito ovog dijela Dubračine, tj. nizvodno od akumulacije

do ušća u Crikvenici, većim je dijelom regulirano (Slike 16. - 17.), a njegova duljina je oko 7.6 km. Za ovaj dio karakteristični su vodni valovi nastali radom HE Vinodol, te veće količine vode koje povremeno dolaze bujičnim tokovima.



Slika 16. Dubračina na mjestu spajanja temeljnog ispusta akumulacija Donji bazen, odvodnog kanala HE Vinodol i kanala kojim dolaze vode s izvorišta Sušik



Slika 17. Ušće Dubračine u Crikvenici Dubračina Tribalj – Crikvenica južno do Triblja

Za središnji i jugoistočni dio sliva karakteristični su izrazito bujični tokovi - Ričina Tribaljska, Pećica, Kostelj, Slani potok, Malenica, Kučana i Mala Dubračina, koje karakterizira veliki pad terena i dijelom nepropusna geološka podloga. Od ovih bujica po svom erozijskom djelovanju najznačajnija je bujica Slani potok na kojoj je aktivno više klizišta. Premda su u zadnjih 100 godina napravljene brojne sanacije klizišta i regulacije korita, klizišta još nisu u potpunosti stabilizirana (Slike 18. - 19.).



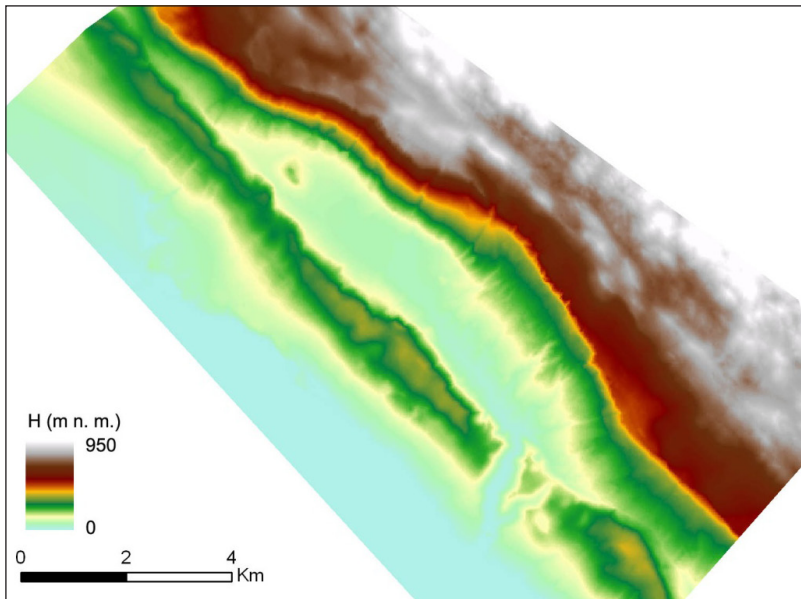
Slika 18. Mjesto gdje se Slani potok ulijeva u Dubračinu



Slika 19. Klizište na Slanom potoku

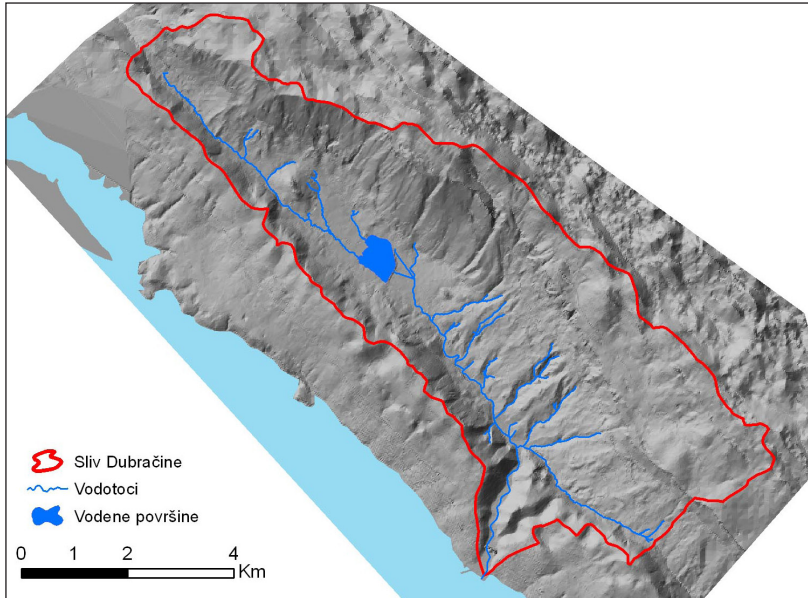
2. Analiza sliva

Za prostornu analizu sliva i toka Dubračine i njenih pritoka korišten je DEM (*Digital Elevation Model*) čija je rezolucija 25x25m, a podaci o visinskim kotama dobiveni su snimanjem iz zraka (Slika 20.). Kako zbog krškog karaktera rubnih dijelova sliva za vodotok Dubračinu ne postoji određena čvrsta hidrološka granica sliva, bilo je potrebno usvojiti takvu granicu.

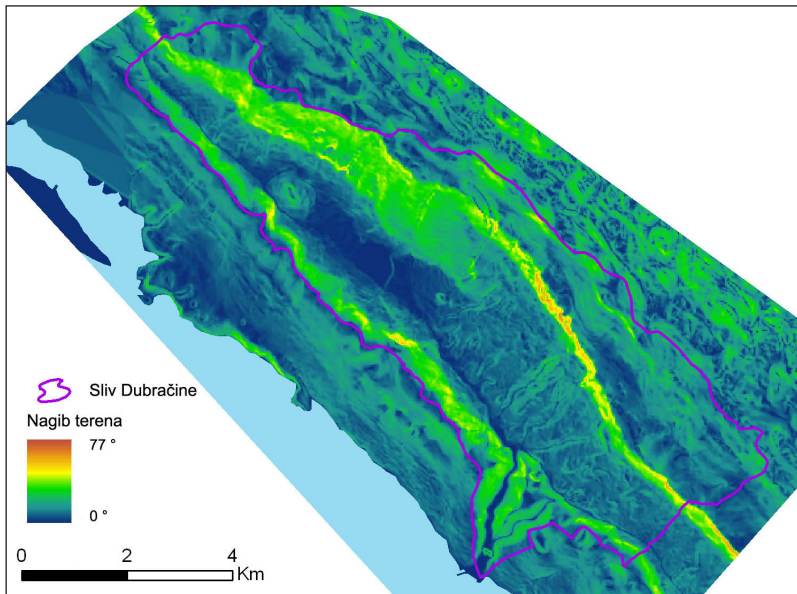


Slika 20. DEM šireg područja oko vodotoka Dubračina

Za granicu sliva uzeta je topografska granica dobivena iz DEM-a uz kontrolu i usporedbu sa podacima karata 1:25000, s tim da su u sliv uključena područja, odnosno vrtače, koje okružuje područje topografskog sliva. Tako dobivenom slivu površina iznosi 46.76 km², te je za područje sliva provedena osnovna statistička analiza DEM-a. Utvrđeno je da je maksimalna visina na slivu 917 m n. m., minimalna 0 m n. m. i srednja 328 m n. m. Zbog potrebe vjernijeg prikazivanja morfologije terena na slivu iz DEM-a napravljen je TIN terena (Triangulated Irregular Network), te je na njemu prikazana granica sliva Dubračine. (Slika 21.)



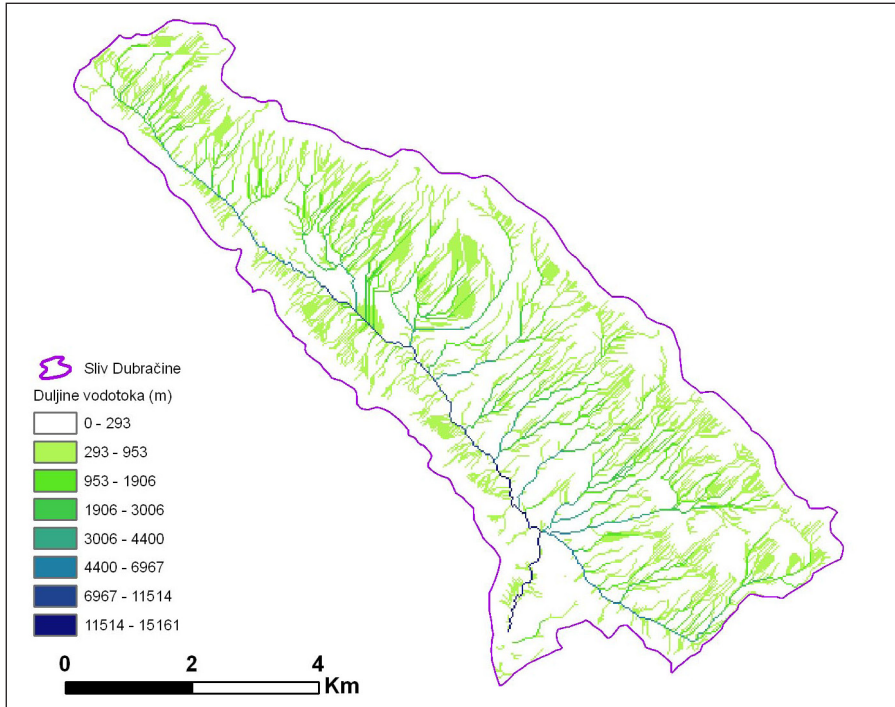
Slika 21. Granica sliva Dubračine prikazana na TIN modelu reljefa



Slika 22. Karta nagiba terena

Za področje sliva također je iz DEM-a izračunat raster nagiba terena iz kojeg je uočljivo da nagibi terena variraju od 0° do 65° , prosječni nagib sliva je 16.2° .

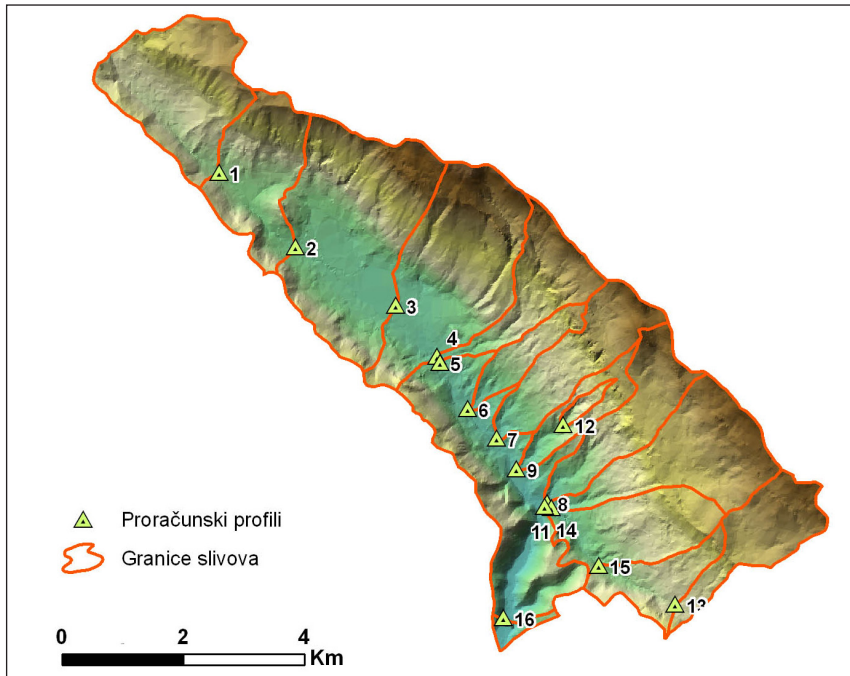
Vrlo blagi nagibi karakteristični su za područje oko Triblja, akumulacije Donji bazen, te uz sam vodotok Dubračine. Ima i vrlo strmih padina Vinodolske doline koje ponegdje na sjevernim dijelovima prelaze i u litice.(Slika 22.)



Slika 23. Duljine površinskih vodenih tokova

Usljedio je izračun duljine tokova vode po površini terena. Ovaj parametar je izračunat na osnovu smjerova tečenja koji su pak dobiveni iz DEM-a (Slika 23.). Usporedbom sa vodenim tokovima ucrtanim na kartama 1:5000 i 1:25000 utvrđeno je da se duljine ovako izračunatog toka većim djelom poklapaju sa onima izmjenjenima na spomenutim kartama, a to vrijedi i za njihov položaj. Greške su se javile samo tamo gdje je zbog antropogenog utjecaja došlo do većih promjena u reljefu, najbolji primjer tomu je vijadukt u Crikvenici i akumulacija Donji bazen, te dio reguliranog korita Dubračine prije ušća u more.

Zbog proračuna maksimalnih protoka na pojedinim karakterističnim profilima na slivu (ušćima bujica u Dubračinu, lokacijama pojedinih mostova vodotoka, lokacijama hidroloških postaja), sliv Dubračne podijeljen je na niz od 15 podslivova (Slika 24.). Za svaki od njih određena je površina sliva te provedena analiza nadmorskih visina, padova terena i duljina vodenih tokova [8]. Rezultati te analiza dati su u tablici 2.



Slika 24. Proračunski profili na odabranim slivovima

Tablica 2. Karakteristični parametri odabranih slivova unutar sliva Dubračine

NAZIV SLIVA	BR. PROFIL	POVRŠINA (kn ²)	VISINA SLIVA (m n. m.)			PAD TERENA (°)			MAKSIMALNA DULJINA TOKA
			MIN	MAX	SR	MIN	MAX	SR	
Dubračina Klarići	1	4,501	118	708	355	0,2	46,5	17,7	4,233
Dubračina Kučani	2	7,766	74	735	314	0,0	50,5	18,1	6,162
Dubračina akumulacija	3	14,860	58	873	295	0,0	56,7	17,7	8,313
Dubračina Tribalj most	4	20,610	46	917	311	0,0	56,7	17,7	9,516
Ričina Tribaljska	5	2,308	46	897	473	1,1	60,0	18,2	4,045
Pećica	6	1,048	33	626	221	0,4	61,0	13,3	2,815
Kostelj	7	2,678	26	870	404	0,0	64,8	14,6	4,133
Slani potok prof. 1	12	0,213	116	524	264	4,4	53,5	16,9	1,869
Slani potok prof. 2	9	1,311	27	742	270	0,9	59,5	16,2	4,098
Malenica	8	2,514	20	825	425	0,1	56,5	14,8	3,891
Kučina	11	3,826	22	850	540	0,3	50,9	13,6	6,732
Malenica prof. 1	13	2,392	184	849	575	0,2	55,9	11,8	3,829
Malenica prof. 2	15	3,991	88	849	440	0,2	60,5	13,0	5,363
Malenica prof. 3	14	10,511	20	849	427	0,2	60,5	13,4	6,843
Dubračina Crikvenica	16	46,445	3	917	330	0,0	64,8	16,3	15,161

3. Analiza hidroloških opažanja

3.1. Prikaz hidroloških mjerenja u slivu

Na vodotoku Dubračina hidrološka opažanja se vrše još od 1947. godine te su se do danas mjerenja vršila na pet hidroloških postaja, od kojih su danas aktivne tri (Tablica 3.). Danas aktivne stanice su Kučani, Tribalj most i Crikvenica, a stanice na kojima se više ne provode mjerenja su Tribalj i Grižanski most (Slika 25.). Velike promjene prirodnog režima otjecanja dogodile su se 1952. izgradnjom hidroenergetskog sustava hidroelektrane Vinodol (Nikola Tesla) i akumulacijskog jezera Donji bazen '80-ih godina 20. stoljeća. Ispuštanje vode iz hidroelektrane Vinodol prati se stanicom HE NT Tribalj koja se nalazi na odvodnom kanalu koji vodi u Dubračinu. Stoga jedino stanica Kučani mjeri prirodno otjecanje na slivu, budući da je smještena uzvodno od Donjeg jezera. Na mjerenja ostalih dviju stanica (Tribalj most i Crikvenica) izuzetno velik utjecaj ima HE NT Tribalj sa svojim maksimalnim protokom od 16.5 m³/s, što zbog naglih promjena u režimu njenog rada stvara poteškoće u izračunavanju protoka iz izmjerenih vodostaja. Tako da za postaju Crikvenica postoje mjerenja vodostaja od 1958., a izračunati protoci dostupni su tek od 1990. godine (Tablica 3.).

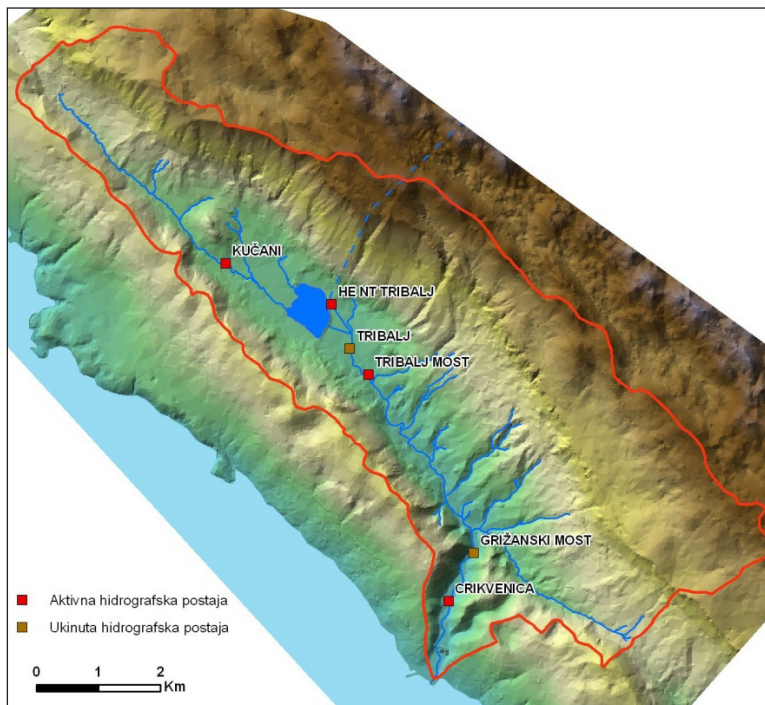
Tablica 3. Aktivnost hidrografskih stanica na području sliva Dubračine

	1947	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	
KUČANI																															
TRIBALJ																															
TRIBALJ MOST																															
GRIŽANSKI MOST																															
CRIKVENICA																															
HE NT TRIBALJ																															

	1977	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	2007
KUČANI																															
TRIBALJ																															
TRIBALJ MOST																															
GRIŽANSKI MOST																															
CRIKVENICA																															
HE NT TRIBALJ																															

■ - podaci o vodostajima

■ - podaci o vodostajima i protocima



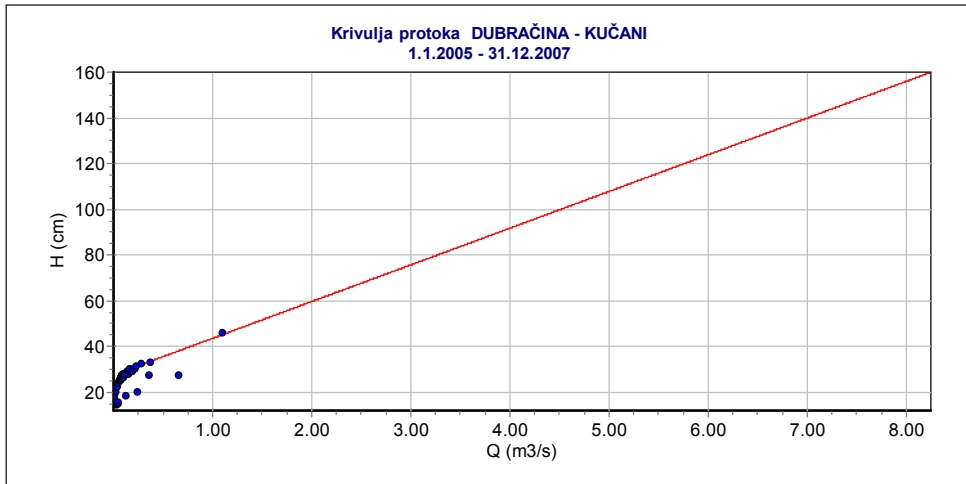
Slika 25. Sliv Dubračine sa prikazom hidroloških stanica

3.2. Hidrološka stanica Kučani - Dubračina

Stanica se nalazi u gornjem dijelu toka Dubračine, na mostu prije zaseoka Kučani (Slika 26.), a s radom počinje 1978. god. Površina neposrednog sliva iznosi 7.766 km².



Slika 26. Pogled na lokaciju hidrološke stanice Kučani – Dubračina

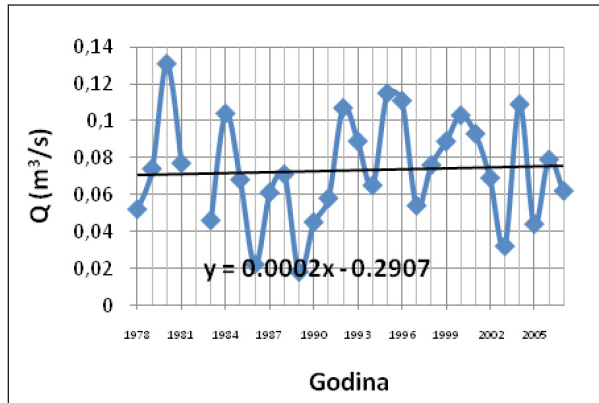


Slika 27. Aktualna konsumpcijska krivulja i rezultati do sada provedenih vodomjerenja na hidrološkoj stanici Kučani - Dubračina (DHMZ)

Rezultati svih do sada provedenih vodomjerenja i posljednja definirana konsumpcijska krivulja [10] prikazani su na Slici 27. Vidljivo je da je vodomjerenjima pokriven mali raspon vodostaja. Maksimalno zapaženi vodostaj iznosi 154 cm, dana 13. 2. 2007., a maksimalni izmjereni protok 1.1 m³/s, dana 24.2.1988.

Protoke na vodotoku, uz redovita presušivanja, osciliraju u relativno uskim granicama. Niske vrijednosti registriranih protoka na tom profilu su posljedica prirodnog stanja toka Dubračine uzvodno od hidrološke postaje – kad se jave velike vode, uglavnom se razlijevaju po nižim dijelovima doline i na taj način se ti vodni valovi spljošte.

Hod srednjih godišnjih protoka na stanici Kučani koja nije pod utjecajem hidroelektrane Tribalj za niz od 1978. do 2007. dan je na Slici 28. Vidljivo je da postoji blagi trend porasta protoka (0.2 l/s godišnje), što je uglavnom posljedica kratkog niza podataka. Kako su raspoloživim nizom obuhvaćene protoke koje počinju osamdesetih godina prošlog stoljeća kada su registrirane do sada najniže protoke, proračunati trend je rastući. Da su mjerenja obuhvatila još desetak ranijih godina (uzima se da nizovi za takva zaključivanja trebaju imati minimum 30-godina), niz bi sigurno bio opadajući. Iz slike je vidljivo da srednje godišnje protoke variraju u jako velikim granicama – od 0.018 m³/s (1989.g.) do 0.131 m³/s (1980.g.).



Slika 28. Trend kolebanja srednjih godišnjih protoka sa stanice Kučani – Dubračina za razdoblje od 1978. do 2007.

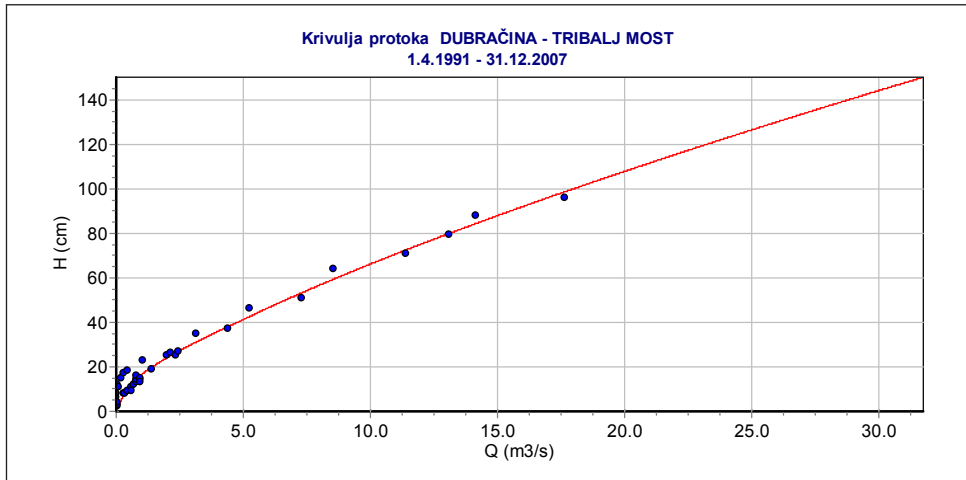
3.3. Hidrološka stanica Tribalj most

Stanica se nalazi u donjem dijelu toka Dubračina, na mostu na cesti Crikvenica - Tribalj, neposredno prije ulaska u mjesto Tribalj (Slika 29.). S radom počinje 1987., ali podaci o protokama postoje od 1990. godine. Površina neposrednog sliva iznosi 20.61 km². Stanica je pod utjecajem rada HE Vinodol, i akumulacije Donji bazen.



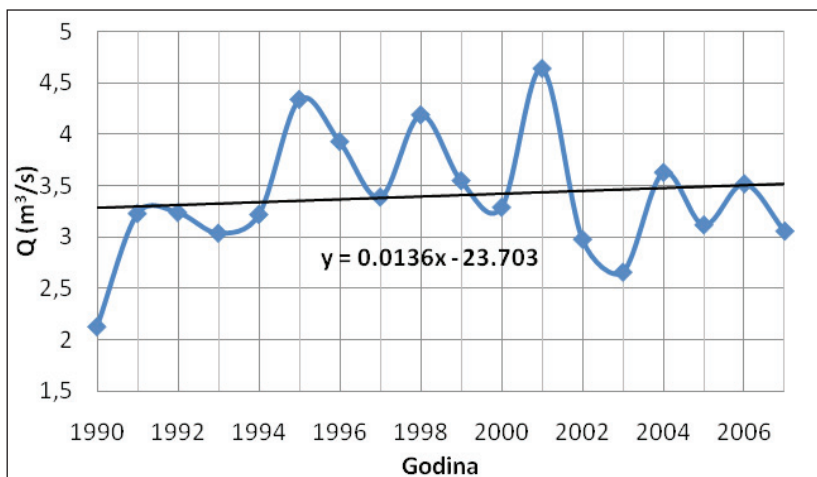
Slika 29. Pogled na lokaciju hidrološke stanice Tribalj most – Dubračina

Rezultati svih do sada provedenih vodomjerenja i posljednja definirana konsumpcijska krivulja [10] vide se na Slici 30. Vidljivo je da je vodomjerenjima relativno dobro pokriven raspon vodostaja. Maksimalni zapaženi vodostaj iznosi 141 cm, dana 27. 12. 1995., a maksimalna izmjerena potoka 17.6 m³/s, dana 11.11.1998.



Slika 30. Aktualna konsumpcijska krivulja i rezultati do sada provedenih vodomjerenja na hidrološkoj stanici Tribalj most – Dubračina (DHMZ)

Vidljivo je da protoke, uz redovita stanja presušivanja, osciliraju u relativno velikim granicama. Razlog tome je rad HE Tribalj koji stvara velike oscilacije u protocima. Hod srednjih godišnjih protoka na stanici Tribalj most za niz od 1990. do 2007. dan je na Slici 31. Vidljivo je da postoji trend porasta protoka (13 l/s godišnje), što je vjerojatno opet posljedica kratkog niza podataka. Vidljivo je da srednje godišnje protoke variraju u jako velikim granicama od 2.13 m³/s (1990.g.) do 4.64 m³/s (2001.g.).



Slika 31. Trend kolebanja srednjih godišnjih protoka s stanice Tribalj most – Dubračina za razdoblje od 1978. do 2007.

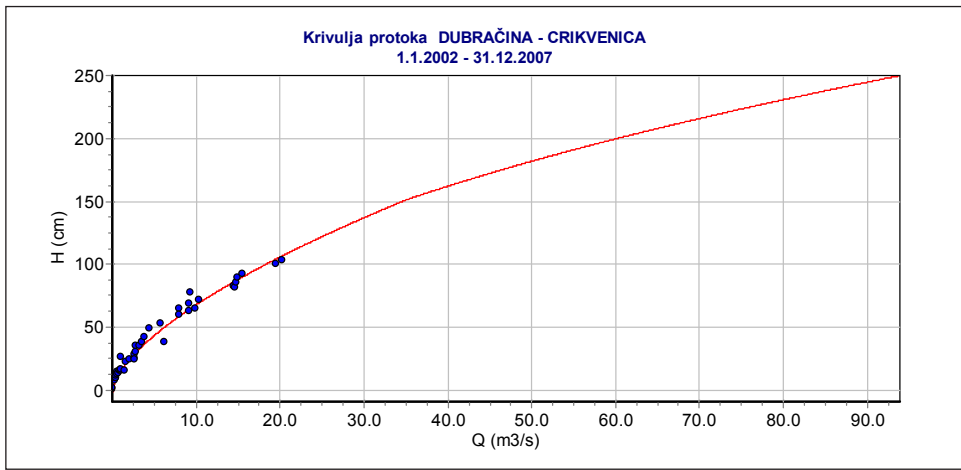
3.4. Hidrološka stanica Crikvenica

Stanica se nalazi u Crikvenici blizu ušća Dubračina u more, na lokaciji uz nogometno igralište kraj hotela u zidanom zaklonu (Slika 32.). S radom počinje 1958., ali podaci o protokama postoje od 1990. godine. Površina neposrednog sliva iznosi 46.445 km². Stanica je pod utjecajem rada HE Vinodol i akumulacije Donji bazen.



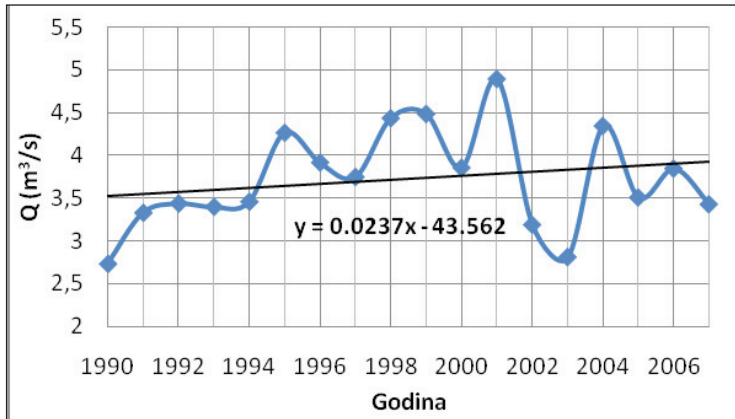
Slika 32. Pogled na lokaciju hidrološke stanice Crikvenica - Dubračina

Rezultati svih do sada provedenih vodomjerenja i posljednja definirana konsumpcijska krivulja [10] vide se na Slici 33. Vodomjerenjima nije pokriven cijeli raspon vodostaja. Maksimalni zapaženi vodostaj iznosi 223 cm dana 25. 9. 1987 iz kojeg je izračunat protok od 74.7 m³/s (PP PGŽ 2000.), premda podaci o protokama postoje samo za razdoblje poslije 1990. Maksimalna izmjerena protoka iznosi 51.1 m³/s, dana 30. 11. 2005.



Slika 33. Aktualna konsumpcijska krivulja i rezultati do sada provedenih vodomjerenja na hidrološkoj stanici Tribalj most – Dubračina (DHMZ)

Vidljivo je da protoke, uz redovita stanja presušivanja, osciliraju u relativno velikim granicama. Razlog tome je rad HE Vinodol koji stvara velike oscilacije u protocima. Hod srednjih godišnjih protoka na stanici Crikvenica za niz od 1990. do 2007. dan je na Slici 34. Vidljivo je da postoji trend porasta protoka (23 l/s godišnje), što je vjerojatno posljedica kratkog niza podataka. Vidljivo je da srednje godišnje protoke variraju u jako velikim granicama od 2.73 m³/s (1990.g.) do 4.9 m³/s (2001.g.).



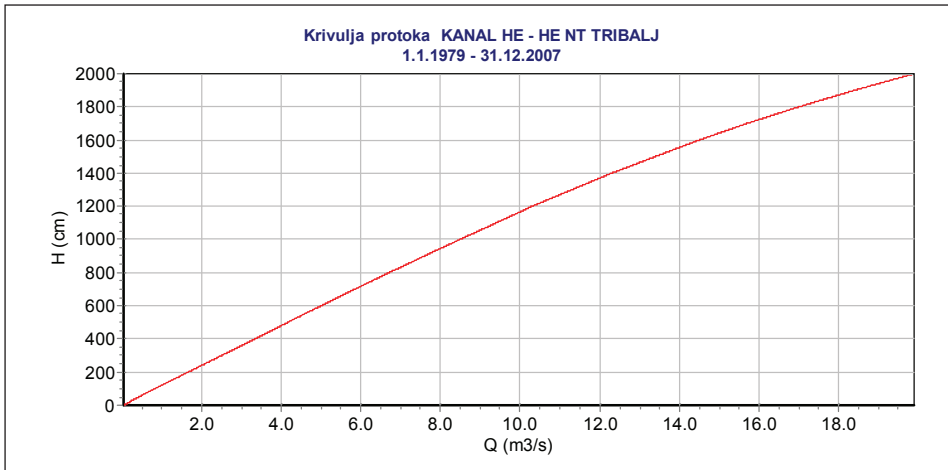
Slika 34. Trend kolebanja srednjih godišnjih protoka s stanice Crikvenica – Dubračina za razdoblje od 1978. do 2007.

3.5. Hidrološka stanica HE NT- Tribalj

Stanica se nalazi u blizini HE Vinodol na njenom odvodnom kanalu (Slika 35.). S radom počinje 1979. godine. Stanica prati rad HE Vinodol tj. istjecanje iz nje. Površina sliva sustava HE Vinodol iznosi 80.8 km² (Hrvatska elektroprivreda, 2000.). Za stanicu je definirana konsumpcijska krivulja [10] na Slici 36.

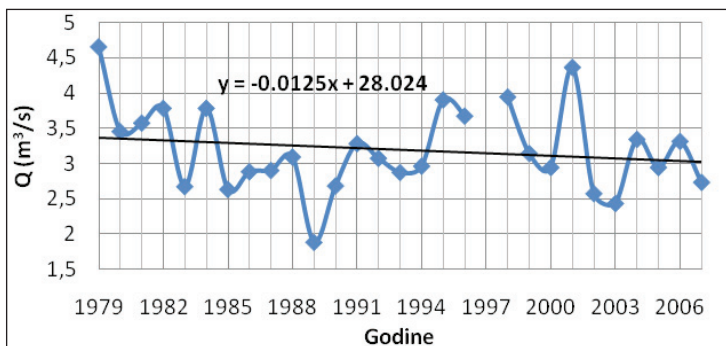


Slika 35. Pogled na lokaciju hidrološke stanice Crikvenica - Dubračina



Slika 36. Aktualna konsumpcijska krivulja na hidrološkoj stanici HE NT Tribalj – Kanal HE (DHMZ)

Protoke osciliraju u relativno velikim granicama, uslijed rada HE Vinodol. Hod srednjih godišnjih protoka na stanici HE NT Tribalj za niz od 1979. do 2007. dan je na Slici 37. Vidljivo je da postoji trend pada protoka (13 l/s godišnje), što je posljedica iznimno velikih srednjih protoka početne 1979. godine, ali i trenda opadanja oborina na području sliva sustava HE Vinodol.

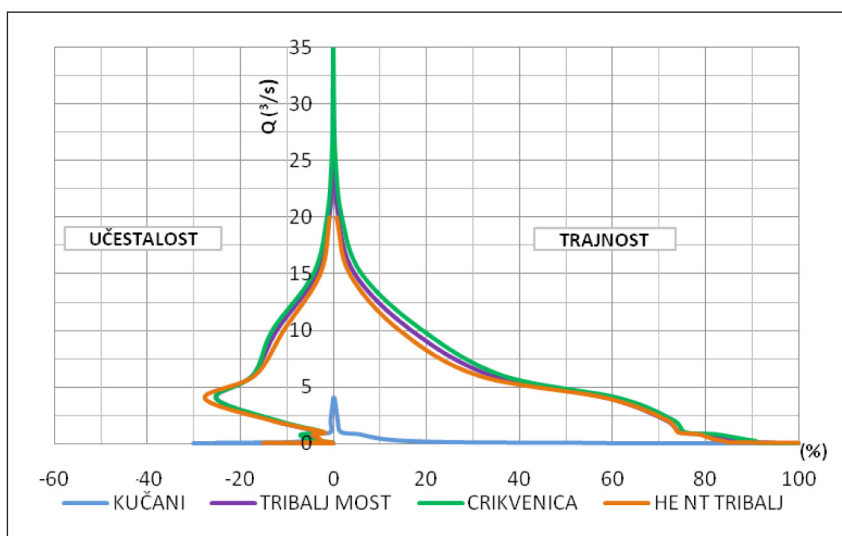


Slika 37. Trend kolebanja srednjih godišnjih protoka s stanice HE NT Tribalj – Kanal HE za razdoblje od 1979. do 2007.

Usporedbom i analizom međuodnosa mjesečnih protoka sa hidroloških stanica na slivu Dubračine za razdoblje mjerenja u kome su bili raspoloživi podaci, zaključeno je da je sustav HE Vinodol bitno promijenio vodni režim srednjeg i donjeg toka Dubračine. U sušnim ljetnim mjesecima protoke iz tog sustava čine gotovo u cijelosti i ukupne registrirane protoke, dok se u vodnijem dijelu godine zapaža i blagi utjecaj dotoka s međusliva do profila Tribalj-most i Crikvenica.

3.6. Analiza učestalosti i trajnosti srednjih dnevnih protoka

Radi detaljnijeg uvida u vodni režim nekoga vodotoka, provode se i analize učestalosti i trajnosti podataka o dnevnim protokama. Ta je analiza u slivu Dubračine provedena za stanice Kučani, Tribalj most i Crikvenica na Dubračini, te Kanal HE Vinodol u Triblju. Rezultati tih obrada dani su za svaku od navedenih. Na Slici 38. dan je skupni prikaz za zajedničko razdoblje obrade (1990.-2007.), izuzev što je zbog nedostatka mjerenja kod stanice HE NT Tribalj korišten niz 1995.-2007. U tom je razdoblju najvodnija godina bila 1995.g., a najsušnija 2003.g.



Slika 38. Krivulja učestalosti i trajnosti srednjih dnevnih protoka stanica u slivu Dubračine (1990.-2007., osim HE NT Tribalj gdje je 1995.-2007.)

I iz obrađenih učestalosti i trajanja dnevnih podataka o protokama vidljiv je dominantan utjecaj rada HE Vinodol na režim otjecanja u slivu Dubračine.

3.7. Analiza vjerojatnosti pojave karakterističnih protoka

U sklopu hidrološke analize podataka prikupljenih na stanicama u slivu Dubračine, provedena je i analiza vjerojatnosti pojava karakterističnih godišnjih protoka. Analiza je provedena programom DIST, a korištene su funkcije raspodjele Gauss, Pearson 3, Log Pearson 3, Gamma 2P, Galton, Gumbel i GEV. Testiranje prilagođavanja provedeno je SK-testom. Srednje godišnje protoke analizirane su i u smjeru pojave njihovih najvećih i najmanjih vrijednosti. Ekstremne godišnje vrijednosti analizirane su u smjeru pojave njihovih ekstrema. Rezultati provedenih

obrada dati su u Tablici 4. Vidljivo je da dominantan utjecaj na protoke minimalne i srednje godišnje protoke imaju vode koje u Dubračinu dotječu sustavom HE Vinodol. Maksimalne godišnje protoke su pak u većoj mjeri posljedica lokalnih hidroloških prilika u slivu Dubračine [8].

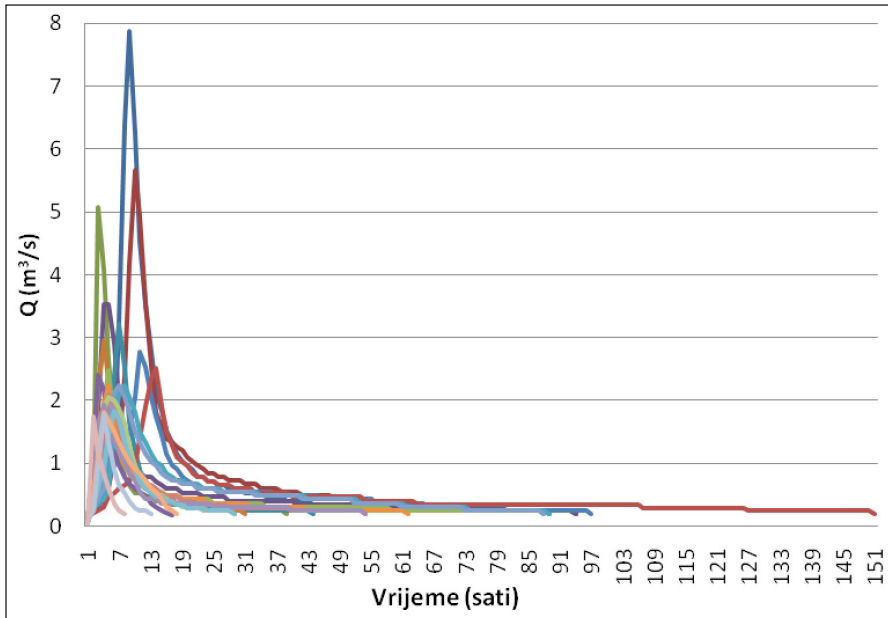
Tablica 4. Rezultati provedenih obrada vjerojatnosti pojave karakterističnih vrijednosti godišnjih protoka u slivu Dubračine

Stanica	Dužina niza (god)	Osmotrene protoke (m ³ /s)				Proračunate vrijednosti protoka za različite povratne periode (m ³ /s)						Korištena raspodijela vjerojatnosti
		Sr	Min	Max	Cv	2 g	5 g	10 g	20 g	50 g	100 g	
Srednje godišnje protoke												
KUČANI	29	0.073	0.018	0.131	0.391	0.073	0.100	0.113	0.122	0.131	0.136	Log Pearson III
						0.073	0.047	0.035	0.027	0.019	0.015	
TRIBALJ MOST	18	3.40	2.13	4.64	0.177	3.36	3.89	4.19	4.45	4.75	4.96	Gamma 2P
						3.36	2.88	2.65	2.47	2.28	2.15	
CRIKVENICA	18	3.73	2.73	4.90	0.158	3.69	4.21	4.52	4.79	5.11	5.34	Galton
						3.69	3.31	3.01	2.84	2.66	2.55	
Maksimalne godišnje protoke												
KUČANI	30	3.87	0.744	8.84	0.505	3.47	5.26	6.5	7.76	9.46	10.8	GEV
TRIBALJ MOST	18	22.6	17.0	28.8	0.142	22.4	25.2	26.8	28.2	29.9	31.1	Galton
CRIKVENICA	18	34.3	22.5	51.1	0.263	32.8	40.8	46.1	51.1	57.7	62.6	Gumbel
Minimalne godišnje protoke												
KUČANI	30	0	0	0.001	3.81	0	0	0	0	0	0	-
TRIBALJ MOST	18	0.006	0	0.024	1.66	0	0	0	0	0	0	-
CRIKVENICA	18	0.016	0	0.282	4.24	0	0	0	0	0	0	-

4. Analiza velikih vodnih valova

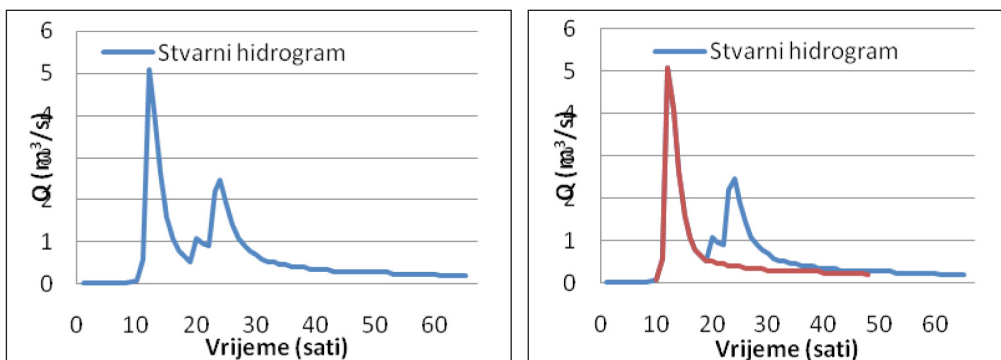
4.1. Odabir i osnovni podaci o velikim vodnim valovima

Analiza velikih vodnih valova je provedena samo za postaju Kučani budući da je ona jedina hidrološka stanica na vodotoku Dubračina koja se nalazi izvan utjecaja hidroelektrane Tribalj i akumulacije Donji bazen. Zato je na njoj jedino moguće sagledati pojavu prirodnih vodnih valova. Iako se mjerenja vrše od 1978.g., potrebni satni podaci o protokama za ovu analizu bili su raspoloživi samo za razdoblje od 1. 1. 2001. do 31. 12. 2007. Stoga je u ovom radu analizirano 20 vodnih valova (Slika 39.) sa najvećim protokom u tom razdoblju. U analiziranom razdoblju najveći opaženi vodni val sa protokom 7.88 m³/s, koji je reda veličine oko 20 godišnjeg povratnog perioda. Budući da su u analiziranom razdoblju osmotrena još samo 2 vodna vala sa maksimalnom protokom u rangi ili većem od one 5 godišnjeg povratnog perioda, ova analiza s obzirom na mali broj satnih podataka možda i ne pokazuje stvarno stanje, već samo njegove naznake.



Slika 39. Veliki vodni valovi s postaje Kučani Dubračina (2001. - 2007.)

Iz satnih su protoka separirani hidrogrami koji su rezultirali najvećom protokom. Kod separacije hidrograma uzeta je vrijednost od $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ kao granica baznog otjecanja. Ta je granična vrijednost odabrana na temelju analize dnevnih podataka o protokama. Preciznije bi se dala odrediti kad bi se za svaki vodni val provodile analize recesije, ali kako se radi o bujičnom vodotoku s malim utjecajem baznog protoka na ukupnu protoku, za analize velikih voda takvo je pojednostavljenje prihvatljivo. Zbog toga analizirani hidrogrami počinju sa prvom satnom vrijednosti protoka manjom od $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$, a završavaju sa prvom satnom protokom manjom od $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ [7]. Primjer takve separacije vodnog vala dan je na slici 40.



Slika 40. Stvarni i separirani vodni val

5. Proračun maksimalnih protoka u slivu Dubračine parametarskim metodama

5.1. Rezultati dosadašnjih obrada maksimalnih protoka

Za sliv Dubračine nema puno sačuvanih rezultata ranijih hidroloških proračuna u arhivi Hrvatskih voda prema kojima su dimenzionirani projektirani i izvedeni hidrotehnički objekti. Razlog tome je i što je neke od objekata izgradio HEP (akumulacija Donji bazen u Triblju) pa te studije nisu bile dostupne, a neki objekti su rađeni i prije više od 80 godina. Najviše informacija o ranijim hidrološkim proračunima dobiveno je iz elaborata *Regulacija potoka Dubračina od km 0+601,80 do 1+158,44 – Novelacija glavnog projekta*. Proračunate maksimalne protoke u tom hidrološkom proračunu dane su u tablici 5.:

Tablica 5. Rezultati hidrološkog proračuna maksimalnih protoka na profilu Crikvenica Dubračina

Povratni period	Protoci za prirodni sliv Dubračine (m ³ /s)	Mjerodavni protoci profil Crikvenica - Dubračina (m ³ /s)
Q ₅	33	50
Q ₁₀	40	56
Q ₂₀	47	64
Q ₅₀	57	73
Q ₁₀₀	65.5	82

U navedenom elaboratu se spominje i da je 1954.g. Projekt iz Zagreba dimenzionirao korito te iste dionice na protoku od 72.5 m³s⁻¹., ali se ne spominje povratni period. Usporede li se vrijednosti iz tablice 5. s proračunatim vrijednostima maksimalnih protoka (za prirodno stanje) u ovom radu (tablica 4), vidljivo je da su vrlo slične, pa ih se može usvojiti. Kako u vrijeme pojava maksimalnih godišnjih protoka nije bilo podatka o radu HE, pretpostavljeno je da nije ni radila (zbog rizika pojava velikih voda) pa se tako dobivenim vrijednostima maksimalnih protoka dodaje 16.7 m³s⁻¹, koliki je maksimalni kapacitet HE.

Za neke od bujica u slivu Dubračine postoje podaci o proračunatim maksimalnim protokama u Katastru bujica RH još iz pedesetih godina prošlog stoljeća (Tablica 6.)

Tablica 6. Osnovni podaci o bujicama u slivu Dubračine iz Katastra bujica RH, te sadašnji nazivi bujica korišteni u ovom radu

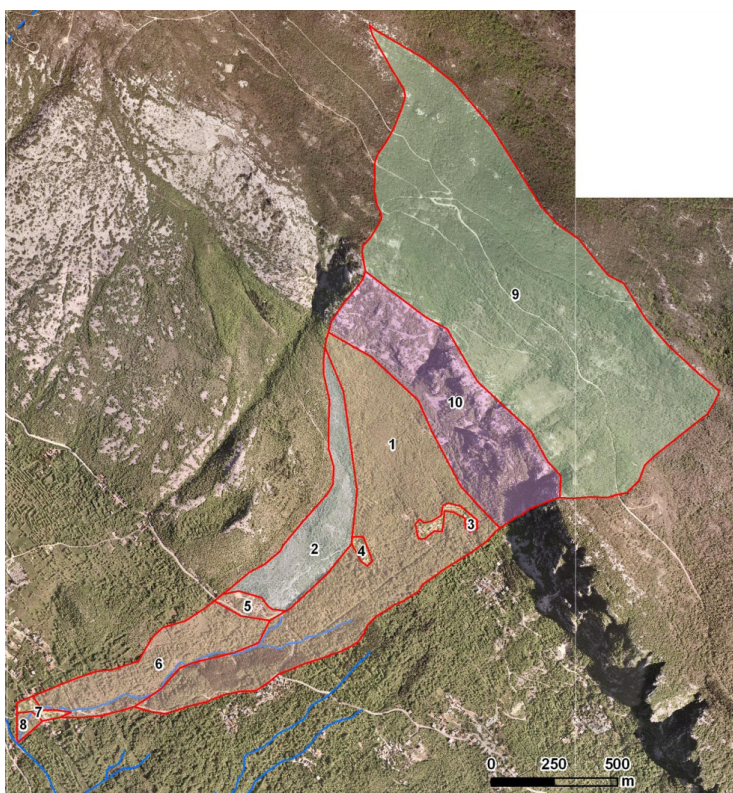
Naziv bujice (prema katastru)	Sadašnji naziv bujice (prema kartama 1:5000)	Dužina gl. toka (km)	Površina sliva (km ²)	Maksimalna protoka (m ³ /s)
Ričina tribaljska	Ričina tribaljska	1.3	3.18	14
Pečca	Pećica	1.15	0.98	12.3
Kostelj	Kostelj	1.5	3.27	12.1
Slani potok	Slani potok	1.8	3.07	25.1
Mala Dubračina	Malecica	2.0	3.54	17.5
Kučina	Kučina	1.3	3.85	9.4
Kričina	Mala Dubračina	3.4	17.85	24.8

5.2. Proračun maksimalnih protoka u slivu Dubračine

Kako su u slivu Dubračine hidrološka mjerenja s raspoloživim duljim nizovima izmjerenih podataka uspostavljena samo na trima hidrološkim stanicama (Kučani, Tribalj most i Crikvenica), za dobiti uvid u stanje protoka i na drugim interesantnim profilima na kojima nije bilo mjerenja, bilo je potrebno provesti proračun velikih voda parametarskim pristupom. Za to je korištena SCS metoda s aproksimacijom hidrograma otjecanja trokutom. Kako su izgradnjom HE Tribalj izmijenjeni uvjeti otjecanja u odnosu na prirodno stanje, podaci s postaja Tribalj most i Crikvenica nisu mogli biti korišteni za ugrađivanje u parametarske metode proračuna. Profil Kučani – Dubračina je izvan utjecaja HE Tribalj jer se nalazi uzvodno od akumulacije Donji bazen. No ni podaci s te postaje, nisu mogli biti šire primjenjivi za slivu Dubračine jer se radi o dijelu sliva na kome se ne javljaju ekstremne protoke. Razlog tome je dolinski tok, sa relativno malim prirodnim koritom. Zato pri svakoj značajnijoj pojavi velikih voda dolazi do plavljenja tog dolinskog područja, pa tako i do smanjenja maksimalnih protoka te do produljivanju vremena podizanja i opadanja hidrograma. Stoga su i ulazni podaci o karakterističnim vrijednostima hidrograma velikih voda određeni na temelju literature, kao i na temelju informacija o sličnim slivovima (Tablica 7 i Slika 41.).

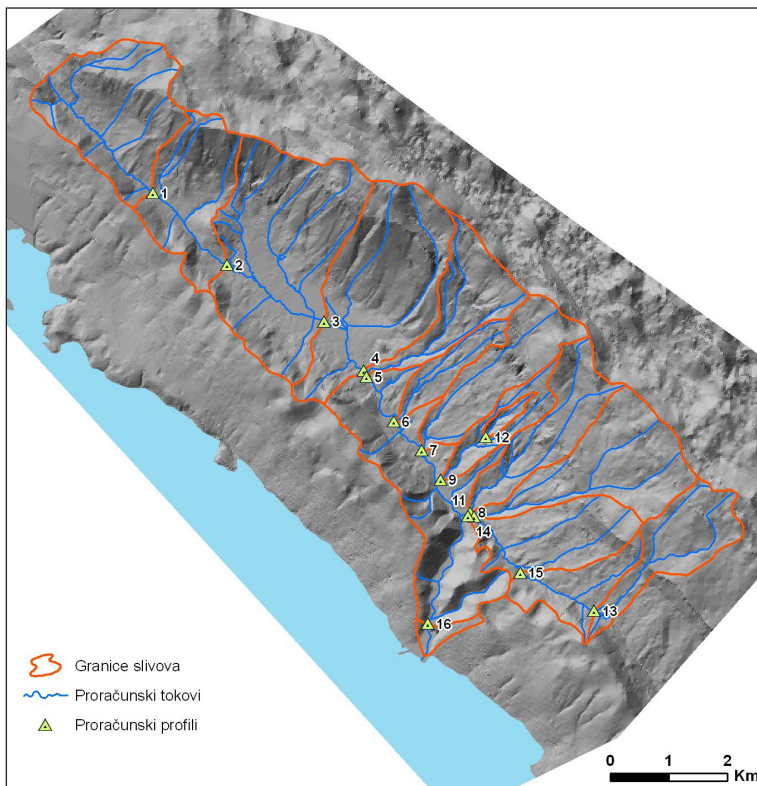
Tablica 7. Vrijednosti CN krivulje za pojedine dijelove bujice Ričina Tribaljska

Br. područja	Površina (m ²)	CN
1	534256	70
2	144117	79
3	12006	80
4	5417	80
5	17166	70
6	148936	70
7	8288	80
8	7323	70
9	1106980	46
10	322518	56
Prosječni CN:		57

**Slika 41.** Sliv bujice Ričina Tribaljska podijeljen na dijelove ovisno o vrijednosti CN krivulje

5.2.2. Rezultati proračuna maksimalnih protoka za odabrane profile

Korištene prostorne podloge koje su poslužile za proračun vremena koncentracije i maksimalnih protoka za odabrane profile prikazane su na slici 42. Za napomenuti je da su najvažniji ulazni podaci za proračun vremena koncentracije dati u tablici 8., gdje su prikazani i rezultati obrada – vrijednosti maksimalnih protoka u slivu Dubračina za prirodne uvjete otjecanja – bez djelovanja objekata HE Vinodol. Kao karakteristične velike vode odabrane su protoke 20 i 100-godišnjeg povratnog perioda. Karakteristike samih vodnih tokova određene su iz GIS podloge topologije terena.



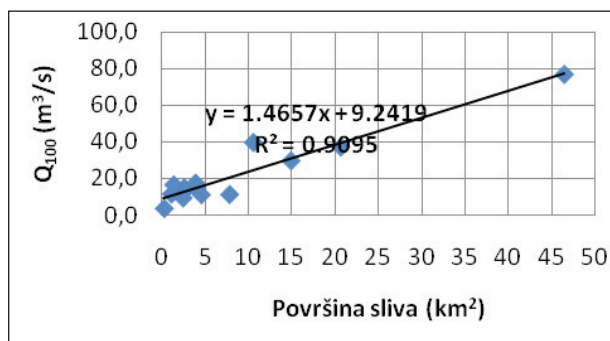
Slika 42. Proračunski profili sa granicama slivova i proračunskim tokovima u slivu Dubračine

Tablica 8. Karakteristični parametri i rezultati proračuna maksimalnih protoka SCS metodom

NAZIV SLIVA	BR. PROFILA	POVRŠINA (km ²)	Vrijeme koncentracije (h)	Koeficijent oblika vod. Vala	Prosječni CN	Q ₂₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)
Dubračina Klarići	1	4.501	1.03	1.5	50	3.2	11.3
Dubračina Kučani	2	7.766	1.45	3.22*	52	3.6	11.4
				2.0		5.0	16.0
Dubračina akumulacija	3	14.860	2.11	2.0	55	10.5	29.8
Dubračina Tribalj most	4	20.610	2.66	2.0	55	13.7	37.3
Ričina Tribaljska	5	2.308	0.49	1.2	57	3.5	12.4
Pećica	6	1.048	0.33	1.2	70	4.2	11.7
Kostelj	7	2.678	0.52	1.2	57	4.0	14.1
Slani potok prof. 1	12	0.213	0.12	1.2	80	2.0	3.8
Slani potok prof. 2	9	1.311	0.40	1.2	75	6.8	16.7
Malenica	8	2.514	0.56	1.2	60	4.6	15.0
Kučina	11	3.826	0.58	1.2	55	4.9	17.6
Mala Dubračina prof. 1	13	2.392	0.53	1.2	52	2.5	9.5
Mala Dubračina prof. 2	15	3.991	0.84	1.2	53	4.2	14.5
Mala Dubračina prof. 3	14	10.511	1.01	1.2	55	12.2	39.8
Dubračina Crikvenica	16	46.445	4.49	1.5	55	31.4	76.9

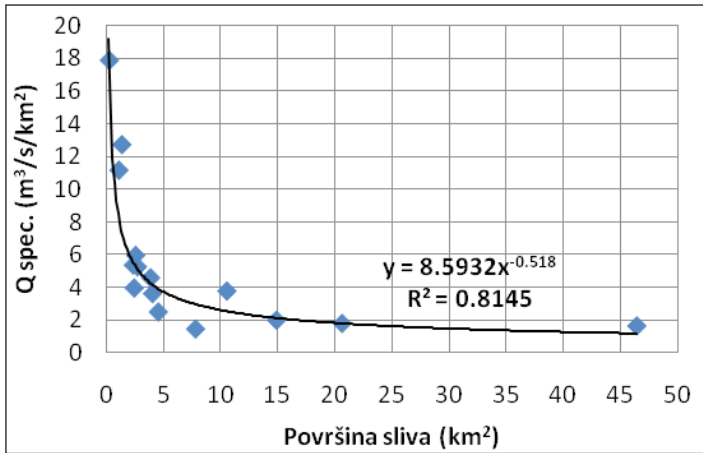
* - određeno na temelju najvećeg do sada zabilježenog vodnog vala

Dobiveni rezultati proračuna prikazani su i na dijagramu odnosa površine sliva i maksimalne 100-godišnje protoke. Vidljivo je da postoji prilično dobra regresijska zavisnost jer je koeficijent determinacije R^2 dosta visok – preko 0.9 (Slika 43.).



Slika 43. Odnos površine sliva i izračunate maksimalne protoke za 100 godišnji povratni period

Isto tako, prikazan je i odnos veličine površine sliva i proračunatih specifičnih maksimalnih protoka 100-godišnjeg povratnog perioda (Slika 44.), a koji isto pokazuje dosta dobru povezanost.



Slika 44. Odnos površine sliva i specifične maksimalne protoke za 100 godišnji povratni period

5.2.3. Usvojene vrijednosti proračuna maksimalnih protoka na profilima za koje su postojali mjereni podaci

Provedena je i usporedba proračunatih vrijednosti maksimalnih protoka po obje metode – na osnovu statističke obrade opaženih hidroloških podataka, kao i na osnovu parametarske SCS metode (Tablica 9.).

Tablica 9. Usporedba rezultata opažanja i proračunatih vrijednosti maksimalnih protoka

Stanica	Br. Profila	Dužina niza (god)	Opažene protoke (m ³ /s)			Statistički proračunate vrijednosti protoka za povratne periode (m ³ /s)		Proračunate vrijednosti maksimalnih protoka SCS metodom za povratne periode (m ³ /s)	
			Sr	Min	Max	20 g	100 g	20 g	100 g
KUČANI	2	30	3.87	0.744	8.84	7.76	10.8	5.0	11.4
TRIBALJ MOST	4	18	22.6	17.0	28.8	28.2	31.1	13.7	37.3
CRIKVENICA	16	18	34.3	22.5	51.1	51.1	62.6	31.4	76.9

Vidljivo je da su 100-godišnje proračunate protoke po SCS metodi nešto veće nego li po proračunatim vjerojatnostima pojave iz izmjerenih podataka, a 20-godišnje manje. Razlog tome je što velik dio sliva Dubračine nije reguliran, tako da se 100-godišnje vode i ne mogu formirati u koritu jer prije toga već poplave po terenu. Time se smanji i njihova ekstremna vršna protoka koja se registrira na hidrološkim stanicama. Treba napomenuti da nije bilo moguće utvrditi da li je u vremenu kad su zabilježene maksimalne protoke radio sustav HE Vinodol, pa je pretpostavljeno da nije, radi obaveza da HEP ne ispušta vodu iz HE kad postoji opasnost od poplava. No, moguće je da su ipak pri nekim

situacijama uzete u obzir i te protoke, koje onda povećavaju rezultate statističkih obrada. Dio razlika je i zbog toga što sliv nije homogen po geološkoj građi, a što SCS metoda ne može uzeti u obzir. S druge strane, prilikom provedenih proračuna nije se uzimao u obzir utjecaj izgradnje akumulacije Donji bazen na smanjenje dijela vršnih protoka. Zato se kao usvojene vrijednosti maksimalnih protoka za hidrološke profile Tribalj most i Crikvenica na Dubračini mogu uzeti statističkim obradama vjerojatnosti proračunate vrijednosti, ali uvećane radi sigurnosti za $15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ koliko je maksimalni kapacitet HE Tribalja (Tablica 10.).

Interesantno je usporediti i proračunate maksimalne protoke u ovom diplomskom radu (Tablica 8.) s rezultatima davnih ranijih proračuna maksimalnih protoka iz katastra bujica (Tablica 6.). Vidljivo je da su u ovom radu proračunate maksimalne protoke 20 i 100-godišnjeg povratnog perioda niže od ranijih (kojima nije određen povratni period, ali se smatra da je to oko 100-godišnjeg). To je, uz metodološke razlike, posljedica toga što je danas sliv značajnije pošumljen nego ranije, pa su i manje pojave bujičnih voda.

Tablica 10. Usvojene vrijednosti proračuna maksimalnih protoka u slivu Dubračine

NAZIV SLIVA	BR. PROFILA	POVRŠINA (kn ²)	Q ₂₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)
Dubračina Klarići	1	4.501	3.2	11.3
Dubračina Kučani	2	7.766	7.8	11.4
Dubračina akumulacija	3	14.860	10.5	29.8
Dubračina Tribalj most	4	20.610	43.2	47.8
Ričina Tribaljska	5	2.308	3.5	12.4
Pećica	6	1.048	4.2	11.7
Kostelj	7	2.678	4.0	14.1
Slani potok prof. 1	12	0.213	2.0	3.8
Slani potok prof. 2	9	1.311	6.8	16.7
Malenica	8	2.514	4.6	15.0
Kučina	11	3.826	4.9	17.6
Mala Dubračina prof. 1	13	2.392	2.5	9.5
Mala Dubračina prof. 2	15	3.991	4.2	14.5
Mala Dubračina prof. 3	14	10.511	12.2	39.8
Dubračina Crikvenica	16	46.445	66.1	79.3

6. Zaključak

U ovom je radu prikazana osnovna hidrologija sliva Dubračine. Provedene analize pokazale su da postoji globalni trend porasta temperatura zraka i opadanja godišnjih količina oborina, kao i dugogodišnji trend opadanja srednjih godišnjih protoka, a koji na kraćim razdobljima pokazuje i suprotno – blagi porast.

Provedene analize velikih vodnih valova pokazale su da ne postoji vrlo čvrsta veza između pojedinih parametara, a razlog čega je i to što je uzvodno

od analiziranog hidrološkog profila Kučani prirodan tok Dubračine s velikim mogućnostima prelijevanja poplavnih voda. Provedene su i parametarske procjene maksimalnih protoka, koje su dale nešto manje protoke nego raniji proračuni, a što je posljedica i puno veće obraslosti sliva nego prije 60-tak godina.

Prilikom provedbe obrada korištene su GIS prostorne podloge, kao orto-foto snimke, čime je bilo moguće puno detaljnije obraditi analizirani sliv u odnosu na klasične metode obrada. Prikazana je i moguća primjena satelitskih daljinskih infracrvenih termalnih snimaka na utvrđivanje prisutnosti vodnih pojava. Te će se tehnologije u skorjoj budućnosti sve više primjenjivati u hidrologiji.

7. Literatura

- [1] Grimani, I., Šušnjar, M., Bukovac, J., Milan, A., Nikler, J., Crnolatac, J., Šikić, I., Blašković, I. (1973): *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000 – list Crikvenica*. Institut za geološka istraživanja, Zagreb, Savezni geološki zavod, Beograd.
- [2] Hidrometerološki zavod NR Hrvatske (1960): *Klimatski podaci za Crikvenicu razdoblje 1892. – 1958*. Hidrometerološki zavod NR Hrvatske. Zagreb.
- [3] Elektroprojekt (2000): *Hidroelektre u Hrvatskoj*. Hrvatska elektroprivreda, Zagreb.
- [4] Hrvatske vode, VGO Primorsko-Istarskih slivova (2004a): *Analiza slivnog područja Vinodolske doline klimatske i hidrološke prilike, radna verzija*. Stručna dokumentacija. Rijeka, nepublicirano.
- [5] Hrvatske vode, VGO Primorsko-Istarskih slivova (2004b): *Kartiranje pokrova / korištenja zemljišta na području Vinodolske doline*. Stručna dokumentacija. Rijeka, nepublicirano.
- [6] Malez M. (1957): *Sušičke jame kod Triblja (Vinodol) Krš Jugoslavije 1*, JAZU, Zagreb
- [7] Ožanić N., Karleuša B., Orbanić J., Žufić E., Žic E. (2003): *Hidrogrami velikih vodnih valova – primjer hidrološke obrade za akumulaciju Križ*. Zbornik radova 3. Hrvatske konferencija o vodama. Hrvatske vode, Zagreb.
- [8] Rubinić, A. (2010): *Hidrološke podloge za vodoprivredu*. Zbornik stručnog seminara Primijenjena hidrologija. Društvo građevinskih inženjera Zagreb, Hrvatsko hidrološko društvo, Zagreb.
- [9] Vodoprivreda (1986): *Karakteristike kratkotrajnih jakih oborina za područje Crikvenice*. Stručna dokumentacija. Rijeka, nepublicirano.
- [10] Vodoprivreda (1986): *Regulacija potoka Dubračina od km 0+601,80 do 1+158,44*. Stručna dokumentacija. Rijeka, nepublicirano.
- [11] Županijski zavod za razvoj, prostorno uređenje i zaštitu okoliša (2004): *Prostorni plan područja posebnih obilježja Vinodolske doline*. Stručna dokumentacija. Rijeka, nepublicirano.

Mehanizmi formiranja postupnog djelomičnog rušenja nasute brane – brana Botonega

Mechanisms for the formation of gradual partial collapse of earth dam – Botonega dam

Ivana Sušanj*, Goran Gjetvaj**, Nevenka Ožanić*, Elvis Žic*

Sažetak. U ovom radu opisani su mehanizmi formiranja otvora u nasutoj brani i rezultati dobiveni matematičkim modelom postepenog djelomičnog proloma nasute brane Botonega, uzrokovani utjecajem prelijevanja. Proračun je izrađen u matematičkom kalkulatoru Microsoft Office Excel 2003. Svrha izrade proračuna je određivanje vremena potrebnog da se, kroz pet faza, formira otvor kroz tijelo brane kao i određivanje dimenzije otvora u tijelu brane. Brzina i razina pozitivnog nizvodnog vala koji nastaje rušenjem brane nije obuhvaćena ovim radom.

Nova saznanja vezana uz mehanizme rušenja nasutih brana omogućila su razvoj novih, znatno realnijih modela formiranja otvora te se u novijoj praksi kao i u prijedlogu novog pravilnika (Pravilnik o određivanju posljedica uslijed prelijevanja ili rušenja brana) predlaže izrada modela postepenog i djelomičnog formiranja otvora usvajajući pritom stvarne karakteristike brane.

U nastavku istraživanja treba izraditi verificiranje proračuna uz pomoć mjerenja na fizikalnim modelima ili u prirodi.

Ključne riječi: nasute brane, erozija tijela brane, postepeno djelomično rušenje brane, brana Botonega, faze rušenja brane,

Abstract. This paper describes the mechanisms and the results obtained by a mathematical model of gradual partial collapse of the earth dam Botonega caused by the influence of spillover. Calculation was created in Microsoft Office Excel 2003. The purpose of the model is to determine the time required for gradual

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci; Viktora Cara Emina 5; 51000 Rijeka,
e-mail: ivana.susanj@gradri.hr; nevenka.ozanic@gradri.hr; elvis.zic@gradri.hr;

** Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Fra Andrije Kačića Miošića 26; 10000 Zagreb,
e-mail: goran@grad.hr

partial collapse of the dam to occur (through the five stages) and the dimensions of the breach through the dam body. The speed and level of a positive downstream wave is not covered in this paper.

New findings about the mechanisms of gradual partial collapse of earth dams have enabled the development of new, much more realistic models of the formation of the breach. In a newer practice (s in the proposed regulations – Regulations about determining the consequences resulting from the overflow, or collapse of dams) it is recommended to form a model of gradual and partial formation of the breach taking the actual characteristics of the dam.

Verification of the model should be performed using the measurements on a physical model or in nature.

Key words: earth dam, erosion of the dam body, gradual partial collapse of earth dam, Botonega dam, dam collapse phases

1. Uvod

Rušenja brana i poplave izazvane *propagacijom poplavnog vala* nisu česte, ali mogu imati katastrofalne posljedice naročito zbog toga što nizvodno od brana obično ima naseljenih područja.

Brane su hidrotehnički objekti koji služe za zadržavanje velikih količina vode tj. za formiranje akumulacija. Upravo zbog toga mogu, u slučaju naglog rušenja, ugroziti stanovništvo i izgrađene objekte nizvodno od brane [1].

Postoje mnogi primjeri urušavanja nasutih brana, koje su uz velike materijalne štete odnijele i mnogo ljudskih života. Zbog toga se nameće potreba za izračunavanjem posljedica rušenja brana.

Obzirom na negativan utjecaj rušenja brana, u ratnim uvjetima ono može biti strateški važno, pa je potrebno unaprijed znati posljedice rušenja (primjer pokušaja rušenja brane Peruče na rijeci Cetini za vrijeme domovinskog rata u Republici Hrvatskoj). Za svaku projektiranu branu se prije izgradnje zahtjeva provođenje ispitivanja o posljedicama loma brane na okolinu, kao što su veličina plavljenog područja i brzina napredovanja poplavnog vala [2].

Općenito, postoje različiti uzroci rušenja nasutih brana. Razlozi mogu biti prelijevanje brane ili djelovanje valova, procjeđivanje i ispiranje tla, pojava pukotina u tijelu brane, erozija uzvodnog pokosa brane, klizanje tla na uzvodnom ili nizvodnom pokosu brane i slično. Između ostalog, prelijevanje brane ili obrušavanje valova, procjeđivanje i ispiranje tla najčešći su i najopasniji uzroci urušavanja nasutih brana.

Rušenje brane u prošlosti (u praksi) se obično računalo pod pretpostavkom da se događa trenutni potpuni lom. Takva pretpostavka je davala najveći i najbrži

poplavni val, pa se takav val usvajao kao najnepovoljniji slučaj. Zbog toga je takav pristup bio ozakonjen u pravnoj regulativi donesenoj 1975. godine (Uputstvo o izradi dokumentacije za određivanje posljedica usred iznenadnog rušenja ili preljevanja visokih brana; sječanj, 1975. g.). Razvoj računala i razna istraživanja omogućila su u novo vrijeme i mnogo detaljnije opise mehanizama rušenja brana. Nova saznanja vezana uz mehanizme rušenja nasutih brana omogućila su razvoj novih, znatno realnijih modela formiranja otvora, te se u novijoj praksi predlaže izrada modela postepenog i djelomičnog formiranja otvora usvajajući pritom stvarne karakteristike brane, među prvima istakli su se Visser (model iz 1998. g.) i Steetzer i De Vroeg (model iz 1998. g.) [3].

Neka istraživanja provedena na fizikalnim i matematičkim modelima (*Istraživanja posljedica uslijed iznenadnog prelijevanja ili rušenja visokih brana; 1998. godine*) pokazala su da, za razliku od trenutnog potpunog rušenja brana, kod postupnog djelomičnog proloma nasute brane vodni val koji se širi nizvodno od brane može biti i do 50% manje razine (razina vodnog vala se povećava postupno s obzirom na povećanje otvora kroz tijelo brane). Činjenica vrlo male vjerojatnosti pojavljivanja trenutnog potpunog rušenja nasute brane, dovodi do zaključka da su neki segmenti projektiranih dijelova moguće predimenzionirani (npr. sistem za obavješavanje stanovništva), te da bi se mogli bolje prilagoditi.

Uz to se kod trenutnog potpunog proloma brane ne uzima u obzir vrijeme koje je potrebno da se stvori nekakav otvor kroz tijelo brane, pa je i s tog stajališta proračun brane na postepeni djelomični prolom zasigurno bliže stvarnom rušenju nasute brane, a time i bolji.

Svojsva strukture izgrađene brane čini branu takvom da mehanizmi loma mogu stvoriti početni otvor na kruni brane. Preljevanje brane ili djelovanje valova može uzrokovati eroziju koja stvara otvor na kruni brane. U slučaju procjeđivanja kroz tijelo brane postoji mogućnost urušavanja brane, kao i stvaranja otvora na kruni brane nakon što se procjeđivanje razvije do te mjere da unutar brane postoje šupljine u kojima se umjesto materijala nalazi voda. Tada dolazi do urušavanja brane. U stvarnosti su također moguće kombinacije više različitih mehanizama loma brane. Ti mehanizmi dovest će do pojavljivanja početnog otvora na kruni brane, uglavnom nepravilnog oblika te različitih veličina. Unutar ovog rada pretpostavljen je relativno mali početni otvor koji je nastao na kruni brane. Također, protok vode kroz početni otvor uzet je kao početak erozijskih procesa na kruni brane. Iako je nastanak otvora na kruni brane bitan preduvjet da dođe do urušavanja brane, u ovom radu su obuhvaćeni samo procesi nakon njegovog nastanka, te se njegove dimenzije zadaju proizvoljno.

U nastavku rada dan je opis fizikalnih procesa postupnog djelomičnog rušenja nasutih brana uslijed prelijevanja dok je zbog jednostavnosti zanemarena

transformacija vodnog vala uslijed dinamike istjecanja vode u akumulaciji. Na primjeru nasute brane Botonega izrađen je matematički model proloma te su prikazani konačni rezultati modeliranja.

2. Pet faza procesa erozije uzrokovanih nastankom početnog otvora na kruni nasute brane

Slično podjeli koju je napravio Visser (1998) [4] za piješčane nasipe, općenito se i cijeli proces erozije na primjeru nasutih brana može podijeliti u pet faza.

U nastavku je dan opis procesa uzrokovanih erozijom vode nakon nastanka početnog otvora na kruni nasute brane koje možemo podijeliti na pet glavnih faza:

- I faza; u trajanju $t_0 \leq t < t_1$
- II faza; u trajanju $t_1 \leq t < t_2$
- III faza; u trajanju $t_2 \leq t < t_3$
- IV faza; u trajanju $t_3 \leq t < t_4$
- V faza; u trajanju $t_4 \leq t < t_5$

2.1. I faza ($t_0 \leq t < t_1$)

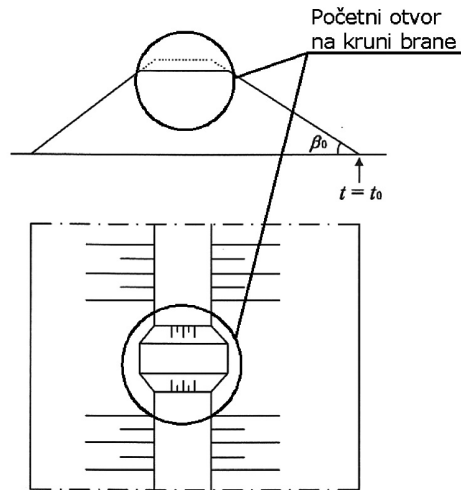
Poplavna voda teče kroz početni otvor na kruni brane i započinje proces erozije na nizvodnom pokosu brane, a ovisno o brzini tečenja vode erodirati se može i krana brane. (Slika 1.)

U stvarnosti, u slučaju preljeva brane, početna točka erozije može se pojaviti bilo gdje na površini brane, što ovisi o toj specifičnoj situaciji, a često je vezana za topografske nepravilnosti na površini brane (diskontinuiteti, pukotine i šupljine). U nekim slučajevima početak erozije povezuje se i sa slabim točkama čvrstoće materijala od kojih je brana izvedena.

Pretpostavlja se da početni otvor na kruni brane ima poprečni presjek u obliku trapeza s nagibom bočnih pokosa pod kutem unutarnjeg trenja materijala γ . Protok kroz taj početni otvor pokreće proces erozije u trenutku $t=t_0$. Zaštitni pokrovi nizvodnog pokosa brane kao što su zatravnjivanje i zaštitna obloga (od kamena, od kamena nabačaja), u ovom radu nisu uzete u obzir zbog velike složenosti problema, iako pod određenim uvjetima mogu do nekog stupnja utjecati na procese erozije (posebno na nastajanje erozije). Iz istog razloga, utjecaj valova također nije uzet u obzir.

Duž pokosa mogu se javiti i posmična erozija i mala udubljenja, a uzrokovana su dinamičkim djelovanjem vode. Tokom erozijskih procesa koji se događaju u

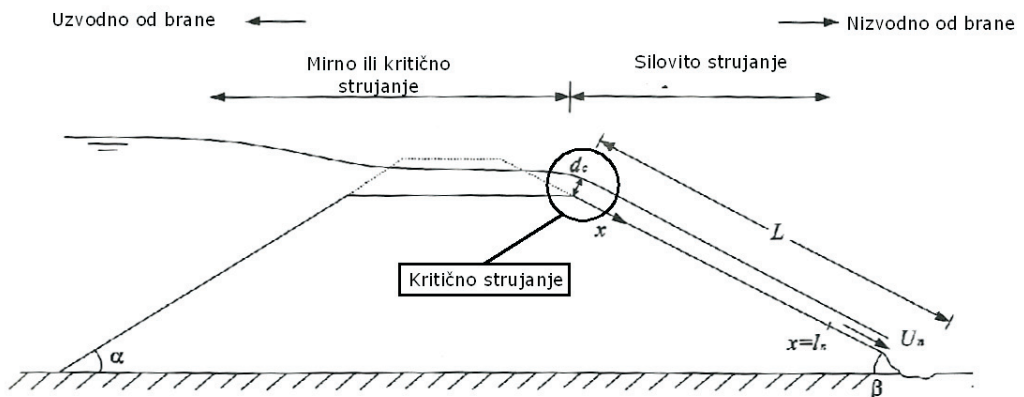
otvoru na kruni nasute brane, tečenje kroz otvor se često aproksimira preljevom sa širokim pragom.



Slika 1. Shematski prikaz izgleda početnog otvora na kruni brane u trenutku $t=t_0$ [5]

Režim tečenja u prvoj fazi moguće je općenito podijeliti na dva uvjeta (*Slika 2.*):

- Protok vode na kruni brane je kritičan, ili miran ali postiže kritično strujanje na nizvodnom rubu krune brane;
- Na nizvodnom pokosu brane tok vode prelazi u siloviti režim, obzirom na to da voda teče po strmom pokosu (gledano sa hidrauličkog stajališta).



Slika 2. Shematski prikaz režima tečenja kroz otvor na kruni brane u prvoj fazi [5]

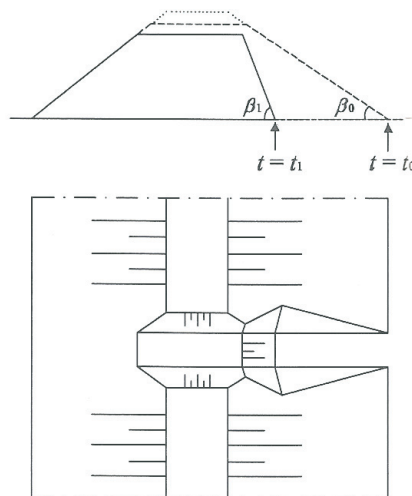
U slučaju visoke vode nizvodno od brane (donja voda), na dnu nizvodnog pokosa (u nožici) može se formirati hidraulički skok koji predstavlja prijelaz iz silovitog u miran režim strujanja nizvodno od brane.

Općenito, erozija koja se javlja na nizvodnom pokosu jača je u nožici pokosa nego pri vrhu pokosa. Prolaskom vode kroz otvor brane i potom nizvodno po pokosu (povećanje brzine vode) postiže se najjači erozijski potencijal u blizini nožice nizvodnog pokosa brane. Taj slučaj se ostvaruje ukoliko pokos nije izrazito dugačak, odnosno duži od dužine na kojoj se događa transport sedimenata.

Takva nejednolika raspodjela djelovanja erozije na pokosu uzrokuje promjenu kuta pokosa u vremenu, te pokos postaje sve strmiji. Pri kraju prve faze u trenutku $t=t_1$ nagib nizvodnog pokosa raste od početnog kuta β_0 do kritičnog kuta β_1 (kut je obično u rasponu između $80^\circ - 90^\circ$), nakon kojeg počinje druga faza. Promjena kuta unutarnjeg pokosa ovisi o vrsti i karakteristikama materijala od kojeg je izgrađena brana (Slika 3.).

U nožici brane, gdje je intenzitet turbulencija vode višestruko jači, i gdje protok postiže svoj najveći erozijski potencijal, za očekivati je da će proces erozije započeti u blizini nožice nizvodnog pokosa brane. Tijekom vremena, djelovanje erozije se širi na cijeli nizvodni pokos brane kao i na krunu brane na mjestu otvora, čineći pokos strmiji te snižavajući visinu brane.

U slučaju male brzine toka vode kroz otvor na kruni brane, ili kad je erozija na kruni brane zanemarujuće mala u usporedbi s onom koja se događa u nožici nizvodnog pokosa brane, eroziju možemo u potpunosti prikazati pod utjecajem erozije u blizini nožice unutarnjeg pokosa brane.

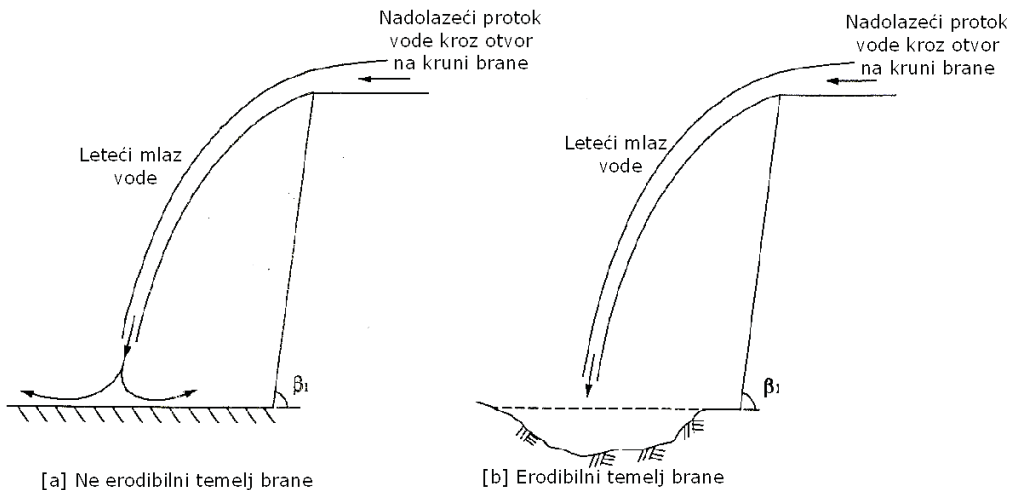


Slika 3. Shematski prikaz izgleda brane po završetku I faze u trenutku $t = t_1$ [5]

2.2. II faza ($t_1 \leq t < t_2$)

U drugoj fazi zadržava se nagib nizvodnog pokosa (kritični kut β_1), te se zbog njegovog strmog nagiba i visinske razlike između krune i nožice brane, ponaša kao preljev. Preljevi se mogu podijeliti s obzirom na oblik (jednostepeni i višestepeni) i erodibilnost temeljnog tla preljeva (u ovom slučaju to je sam temelj brane koji može biti erodibilan ili neerodibilan). S obzirom na gore navedenu podjelu postoje 4 moguće vrste preljeva: jednostepeni preljev s erodibilnim temeljem, jednostepeni preljev s neerodibilnim temeljem, višestepeni preljev s erodibilnim temeljem i višestepeni preljev s neerodibilnim temeljem.

Zbog velike složenosti proračuna erozijskih procesa na višestepenom preljevu, u matematičkim se modelima obično računaju jednostepeni preljevi s erodibilnim ili neerodibilnim temeljem (*Slika 4.*).



Slika 4. Skica jednostepenog preljeva na nizvodnom pokosu brane sa neerodibilnim i erodibilnim temeljem [5]

Slike 5. i 6. prikazuju, na primjeru dva preljeva (jedan s erodibilnim temeljem i jedan s neerodibilnim temeljem), pojavu četiri vrste erozije (koje se nadalje javljaju i u trećoj fazi):

1. Prvi tip erozije

Prvi tip erozije javlja se na vršnoj površini preljeva, nastaje zbog protoka vode i naziva se posmična erozija. Utjecaj posmične erozije očituje se u snižavanju visine brane.

2. Drugi tip erozije

Drugi tip erozije javlja se duž nizvodnog pokosa brane, odnosno na pokosu preljeva. Ova erozija se sastoji od posmične erozije izazvane hidrauličkim posmičnim naprezanjima koja nastaje zbog vode koja se obrušava niz pokos i klizanja sloja materijala na pokosu zbog fluidizacije.

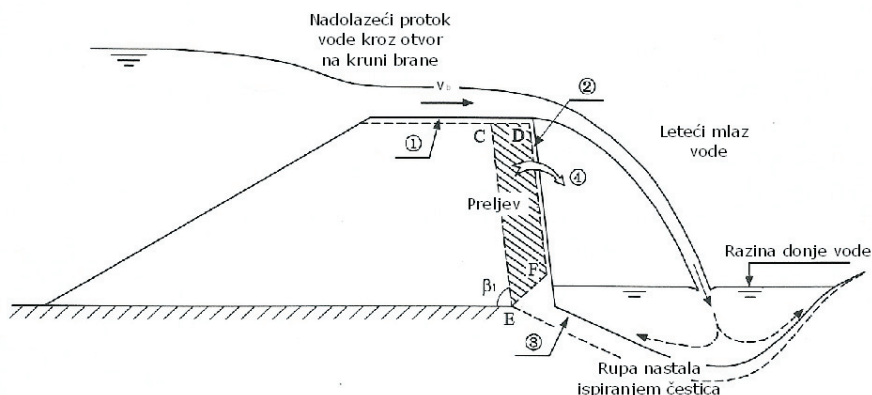
3. Treći tip erozije

Treći tip erozije javlja se na temelju preljeva (brane), gdje zbog udara mlaza vode u temelj (ukoliko je erodibilan) dolazi do ispiranja čestica materijala i nastajanja rupa te postepenog podlokavanja nožice pokosa.

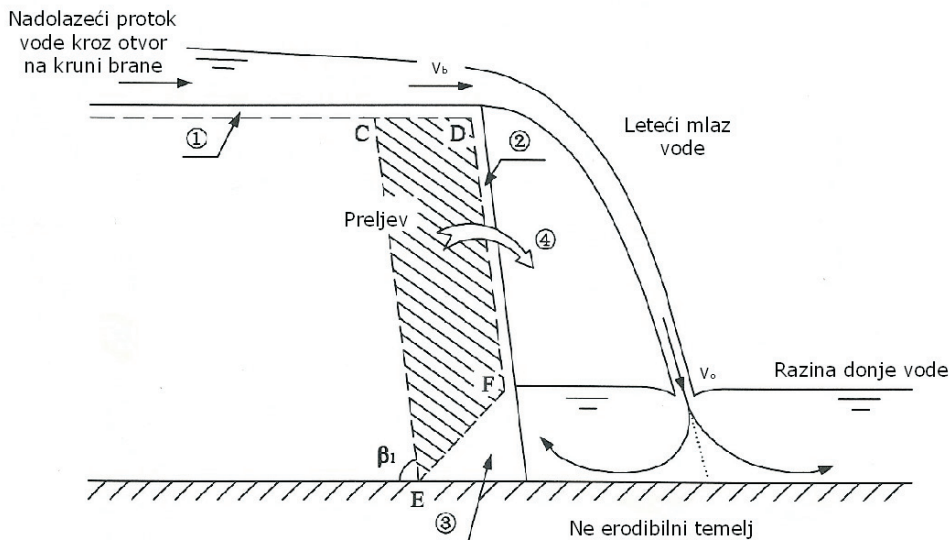
Udar preljvnog mlaza vode utječe na nizvodni temelj brane, izazivajući intenzivne turbulencije u prostoru udara mlaza i stvara znatne erozivne sile kako na temelju tako i u nožici brane. Kao rezultat dobivamo rupu nastalu ispiranjem čestica tla u temelju (ukoliko je temelj erodibilan). Ta rupa se širi i horizontalno i vertikalno kroz vrijeme, te u određenom trenutku počinje podlokavati nizvodni pokos brane. Ukoliko je temelj neerodibilan, mlaz koji udari u temelj djelom će skrenuti strujnice prema pokosu, a djelom u suprotnom smjeru prilikom čega započinje podlokavanje pokosa brane.

4. Četvrti tip erozije

Kada se podlokavanje pokosa brane razvilo do određenog kritičnog stupnja, preljev postaje nestabilan i ne može se više oduprijeti djelovanju sile teže i silama procjeđivanja, te dolazi do sloma tla i obrušavanja djela pokosa preljeva koji ćemo definirati kao blok materijala.



Slika 5. Erozijski procesi na preljevu za vrijeme postepenog djelomičnog proloma brane s erodibilnim temeljem: **1** - posmična erozija izazvana tokom vode na površini na vrhu preljeva; **2** - erozija duž nizvodnog pokosa brane; **3** - ispiranje čestica na temelju brane i podlokavanje nožice nizvodnog pokosa brane; **4** - slom bloka tla (CDFE) na nizvodnom pokosu brane [5]

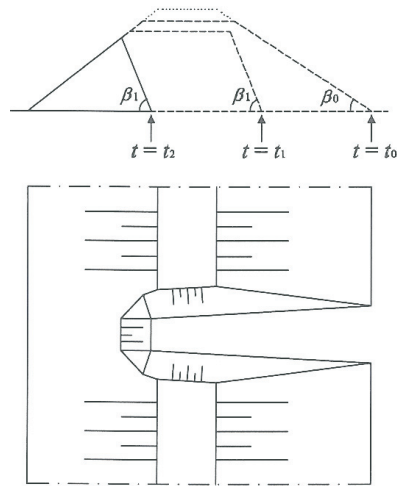


Slika 6. Erozijski procesi na preljevu za vrijeme postupnog djelomičnog proloma brane s ne erodibilnim temeljem: 1-posmična erozija izazvana tokom vode na površini na vrhu preljeva; 2-erozija duž nizvodnog pokosa brane; 3-podlokavanje nožice nizvodnog pokosa brane; 4-slom bloka tla (CDFE) na nizvodnom pokosu brane [5]

Kao rezultat spomenutih četiriju mehanizama erozije, pokos (strmi nizvodni pokos brane) se pomiče uzvodno nejednoliko, ali neprestano kako vrijeme ide u drugoj fazi, a s time se i smanjuje širina krune brane. U isto se vrijeme visina brane, na mjestu otvora na kruni brane, smanjuje zbog erozije uzrokovane tokom vode kroz otvor. Na kraju druge faze preljev se pomiče do uzvodnog pokosa brane te u trenutku $t = t_2$ u potpunosti nestaje kruna brane (na mjestu otvora brane; Slika 7.).

Pretpostavljeno je da se urušavanje bloka CDFE (točke koje označavaju dio pokosa preljeva koji će se urušiti; Slika 5. i 6.) odvija rotacijom oko točke E, što je vjerojatnije nego da se blok otkliže prema dolje. Nakon što se dogodi slom materijala, širina preljeva se smanjuje za širinu bloka koji se urušio, nakon čega se preljevni mlaz vode prilagođava novonastalom stanju te započinje ponovo novi ciklus erozijskih procesa.

Fluidizacija površine nizvodnog pokosa brane zbog raspršenog mlaza vode u drugoj fazi (također kasnije i u trećoj fazi) smanjuju mehaničku čvrstoću tla površinskog sloja i ubrzavaju erozijske procese. No, kvalitetno razmatranje ovih utjecaja je vrlo teško.



Slika 7. Shematski prikaz izgleda brane nakon II faze u trenutku $t = t_2$ [5]

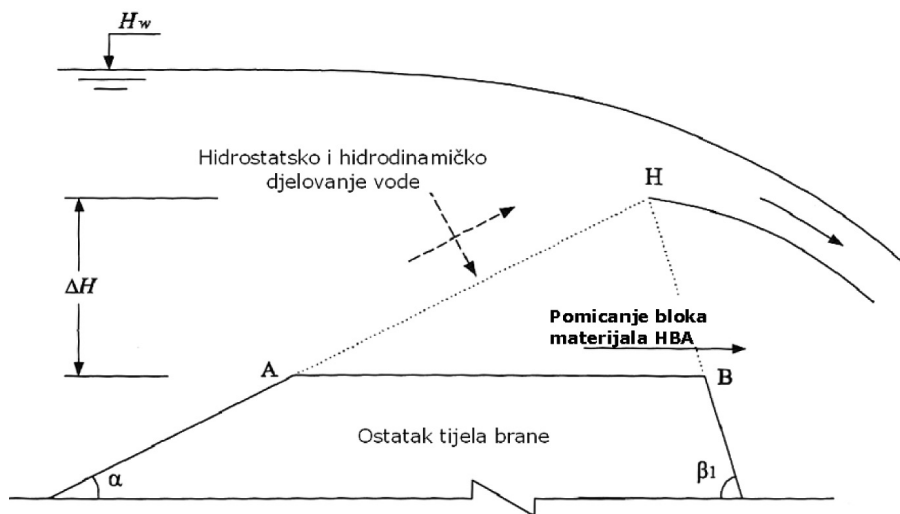
2.3. III faza ($t_2 \leq t < t_3$)

U početku treće faze u trenutku $t = t_2$ preljev se pomaknuo do uzvodnog pokosa brane, a poprečni presjek ostatka tijela je trokutno oblikovan, no i dalje nizvodni pokos brane zadržava kritični nagib pod kutom β_1 kroz treću fazu.

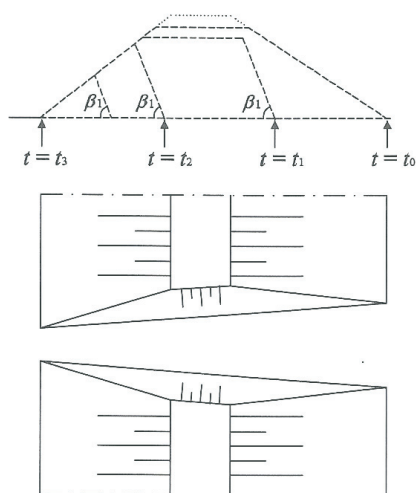
U trećoj fazi nizvodni pokos brane zadržava kritični kut β_1 . Različiti mehanizmi erozije opisani u drugoj fazi vrijede također i u trećoj fazi. Jedina razlika između ove dvije faze je u tome što je u trećoj fazi tijelo brane mnogo tanje i slabije pa se proces erozije odvija brže.

Preostali dio tijela brane teško može odoljeti silama vode (kako hidrostatskim tako i hidrodinamičkim) od rijeke (ili mora, ili akumulacije) i zbog toga vrlo brzo dolazi do ispiranja (pomicanja) dijela brane do određene visine, što rezultira brzim povećanjem otvora i povećanjem protoka kroz otvor (blok ABH – točke koje označavaju dio tijela brane koji će se pomaknuti; *Slika 8.*).

Povećanje otvora brane uzrokuje prirast protoka i utjecaj erozije na tom mjestu. Geometrija samog otvora se također mijenja, pa bočni pokosi postaju strmiji i od početnog kuta γ dostižu kritični kut β_1 . U trenutku $t = t_3$ tijelo brane, na mjestu otvora, u potpunosti nestaje, odnosno isprano je pod utjecajem erozije do temelja brane ili do zaštitne nožice na nizvodnom pokosu brane, ukoliko ona postoji. U tom trenutku završava treća faza (*Slika 9.*).



Slika 8. Shematski prikaz pomicanja bloka ABH – ostatka tijela brane ubrzo nakon trenutka $t=t_2$ [5]



Slika 9. Shematski prikaz izgleda brane nakon III faze u trenutku $t = t_3$ [5]

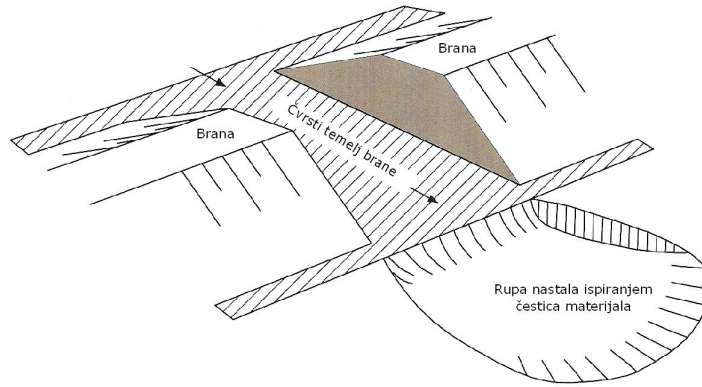
Zajedno s redukcijom širine i visine brane na mjestu otvora brane u trećoj fazi, uloga sloma tla na pokosu brane će opadati, a nasuprot toga, uloga posmične erozije uzrokovane tokom vodom u granicama otvora brane porasti će zbog povećanja protoka.

2.4. IV faza ($t_3 \leq t < t_4$)

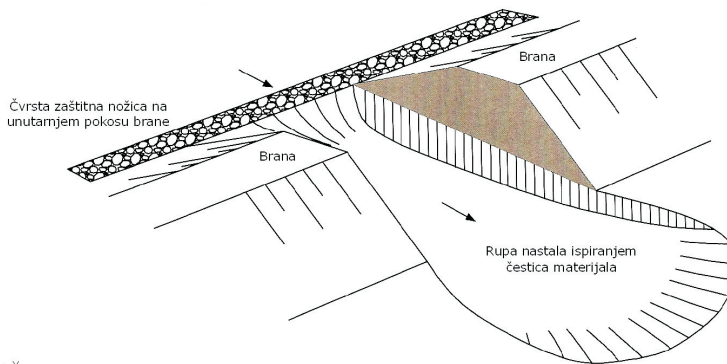
Četvrta faza započinje kada je tijelo brane na mjestu otvora erodiralo do temelja brane, ili, ako postoji, do zaštitne nožice na dnu uzvodnog pokosa brane. Erozijski otvor je u ovoj fazi (kao i u petoj fazi) primarno bočna. Utjecaj vertikalne erozije u ovim fazama ovisi primarno o određenim geometrijskim karakteristikama brane i o svojstvima materijala od kojih je sačinjena:

- otpornost temelja brane od daljnje erozije;
- postojanje zaštitne nožice na dnu uzvodnog pokosa brane i njezina sposobnost da štiti uzvodni pokos od daljnje erozije;
- postojanje relativno visoke razine tla iza brane (odmah uz uzvodni pokos brane) i njegova otpornost na eroziju i postojanje efektivne zaštite.

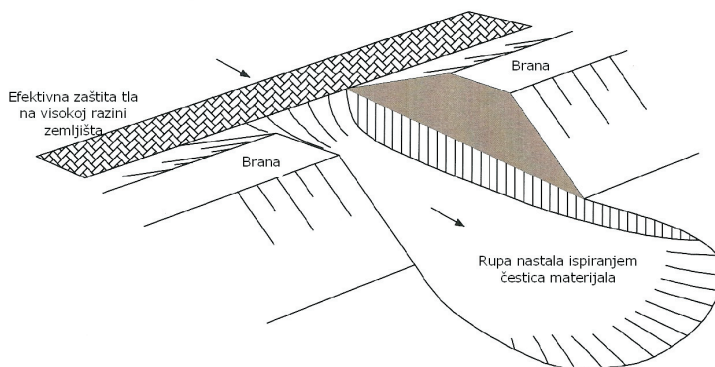
Ovisno o spomenutim mjerilima, prikazujemo tri tipa ponašanja otvora vezano za četvrtu i petu fazu postepenog djelomičnog proloma brane [5]. Ako je vertikalna erozija na dotoku u otvor spriječena ili jako usporena čvrstim temeljem brane, čvrstom zaštitnom nožicom na uzvodnom pokosu brane, relativno visokom razinom tla iza brane i njegovom efektivnom zaštitom, javlja se TIP A otvora (*Slika 10.*). U ovom slučaju “čvrsto” znači da materijal posjeduje visoku otpornost na djelovanje erozije. TIP B otvora podrazumijeva postojanje relativno visoke razine tla iza brane (odmah uz uzvodni pokos brane), no u ovom slučaju neotpornog na eroziju (*Slika 11.*). Sve ostale slučajeve koji se mogu javiti svrstavamo u TIP C otvora (*Slika 12.*).



[a]

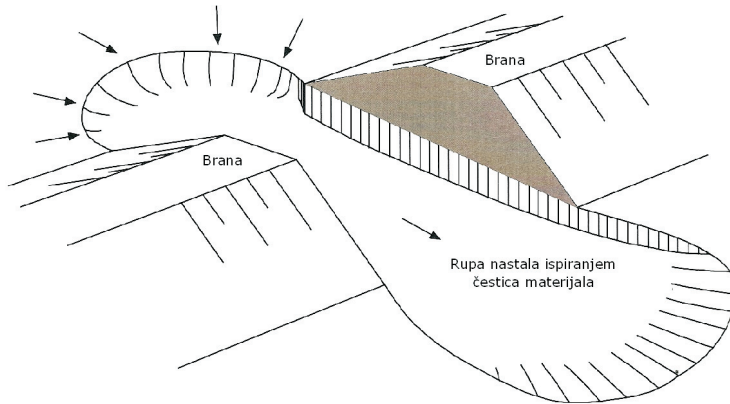


[b]

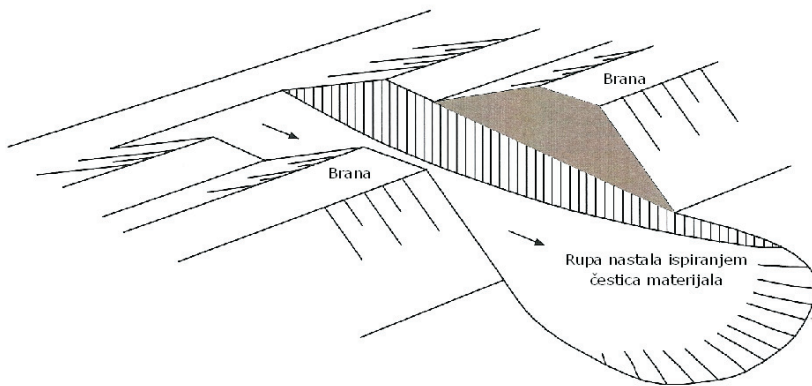


[c]

Slika 10. Vertikalna erozija je u četvrtoj fazi spriječena čvrstim temeljem brane [a], čvrstom zaštitnom nožicom na unutarnjem pokosu brane [b] ili visokom razinom zemljišta uz unutarnji pokos brane i njegovom efektivnom zaštitom [c] (TIP A otvora) [5]

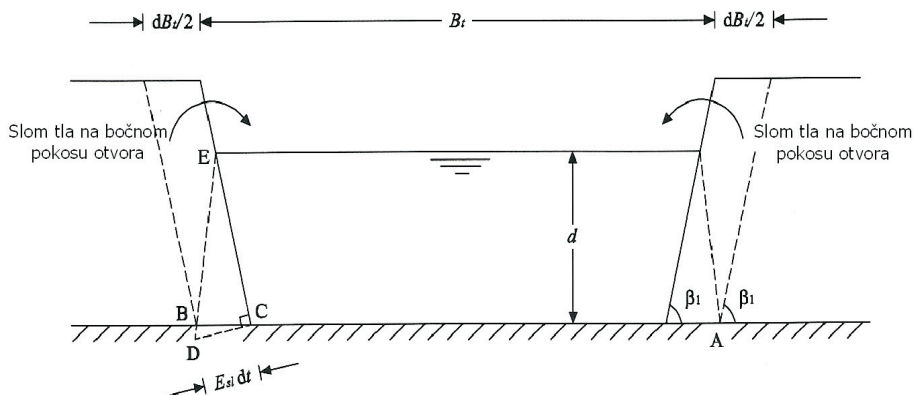


Slika 11. Vertikalna erozija je u četvrtoj fazi s erodibilnom visokom razinom zemljišta uz unutarnji pokos brane (TIP B otvora) [5]



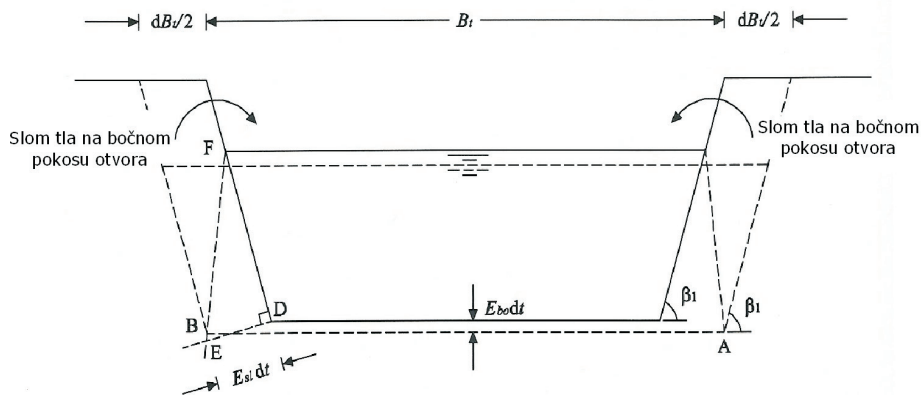
Slika 12. Vertikalna erozija u petoj fazi (TIP C otvora) [5]

Protok kroz otvor brane nameće posmično naprezanje na oba bočna pokosa otvora i na dno otvora brane, što vodi do toga da bočni pokosi postaju sve strmiji, zbog snažnije erozije koja se javlja na donjim dijelovima pokosa. Uzročno tome, kut pokosa raste i dostiže kritični kut β_1 , izazivajući slom tla s prestrmog bočnog pokosa u određenom trenutku. Kada se nakon određenog vremena nagib bočnog pokosa otvora ponovno vrati na kut β_1 , započinje ponovno ciklus bočne posmične erozije na pokosima i slom tla. Proces odvajanja bloka materijala s bočnih pokosa se često događa prevrtanjem oko točaka A i B (Slika 13. i 14.).



Slika 13. Povećanje širine otvora na brani u četvrtoj i petoj fazi (TIP A otvora) [5]

Slika 13. shematski prikazuje porast širine otvora u četvrtoj i petoj fazi za TIP A otvora pri kojem je E_{sl} posmična erozija na dnu bočnih pokosa. Vertikalna je erozija na dotoku u otvor spriječena ili jako usporena čvrstim temeljem brane, čvrstom zaštitnom nožicom na vanjskom pokosu brane ili relativno visokom razinom tla iza brane i njegovom efektivnom zaštitom. Kada posmična erozija pri dnu bočnih pokosa otvora brane postigne određeni stupanj, bočni pokosi postaju prestrmi da bi ostali stabilni te dolazi do sloma tla.

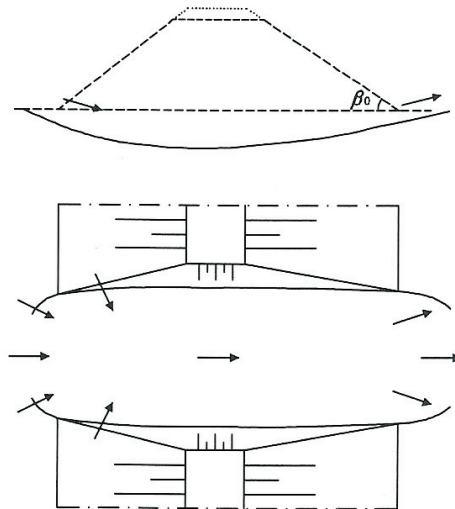


Slika 14. Povećanje širine otvora na brani u četvrtoj i petoj fazi (TIP B i TIP C otvora) [5]

Slika 14. shematski prikazuje povećanje širine otvora na brani u četvrtoj i petoj fazi kada je temelj brane erodibilan (TIP B i C otvora). Erozijska se u otvoru ne javlja samo bočno (E_{sl}), već i na dnu otvora brane (E_{bo} – erozija na dnu otvora

brane). U realnim slučajevima proloma velikih brana, konačna širina otvora brane obično ima red veličine od stotinjak metara, dok dubina otvora ima red veličine od desetak metara. Obično je krajnja širina otvora puno veća u odnosu na njegovu dubinu. Zbog toga, je za TIP B i C otvora brane (kada je temelj brane erodibilan), erozija na dnu mnogo manja nego na dnu bočnih pokosa otvora u četvrtoj i petoj fazi postupnog djelomičnog proloma brane. Zato možemo reći da rast širine otvora brane (B_p) primarno ovisi o posmičnoj eroziji bočnih pokosa (E_{sl}), a potom i o vertikalnoj eroziji dna otvora (E_{bo}) u dvije zadnje završne faze za TIP B i TIP C otvora brane.

Za vrijeme procesa erozije u otvoru brane, zajedno s protokom vode kroz otvor i utjecanjem vode u nizvodni okoliš (ili korito), razina donje vode neprestano raste, posebno nakon trenutka $t = t_3$ kada je brana u potpunosti prolomljena. Pri kraju četvrte faze u trenutku $t = t_4$ razina donje vode je narasla do te mjere (razine) da je počela utjecati na protok vode koji utječe u nizvodni okoliš. Protok vode mijenja uvjete prelaskom iz tečenja sa slobodnom površinom (pod utjecajem visoke donje vode) u uvjete potopljenog tečenja.



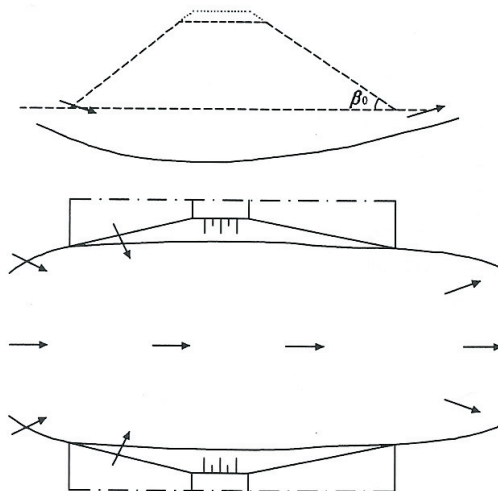
Slika 15. Shematski prikaz izgleda brane nakon IV faze u trenutku $t = t_4$ [5]

2.5. V faza ($t_4 \leq t < t_5$)

U petoj fazi zbog rastućeg ometajućeg efekta donje vode, dolazi do postepenog smanjivanja protoka i brzine vode kroz otvor brane, a s tim i do smanjenja utjecaja erozije. U ovoj fazi se i dalje primarno događa posmična erozija na bočnim pokosima otvora brane. Utjecaj vertikalne erozije u ovoj fazi i dalje ovisi

o određenim geometrijskim karakteristikama brane i o svojstvima materijala od kojih je sačinjena. Dominantni mehanizmi erozije u otvoru brane su, kao i u četvrtoj fazi, posmična erozija uzrokovana tokom vode duž bočnih pokosa otvora, te kao rezultat erozije mehanička nestabilnost tla na tim istim pokosima.

Pred kraj pete faze u trenutku $t = t_5$ brzina toka vode kroz otvor brane je toliko smanjena da više ne može erodirati niti tijelo brane niti njezin temelj. Na taj način otvor poprima svoju krajnju dimenziju i u trenutku $t = t_5$ završava rast otvora. Unatoč maloj brzini vode kroz otvor, voda i dalje protječe kroz otvor brane i utječe u nizvodni okoliš nakon vremena $t = t_5$ (Slika 16.). Protok kroz otvor brane završiti će u trenutku $t = t_6$ ukoliko se izjednače razina donje vode i razina vode iza brane (razina vode rijeke ili mora) ili se razina vode iza brane spusti niže od same razine dna otvora.



Slika 16. Shematski prikaz izgleda brane nakon V faze u trenutku $t = t_5$ [5]

3. Prikaz rezultata matematičkog modela na primjeru brane Botonega

Brana Botonega izgrađena je 1986. godine na vodotoku Butoniga u slivu rijeke Mirne. Visinom od 23 metra, dužinom od 590 metara, te volumenom akumulacijskog bazena od $19,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ spada u velike brane (prema definiciji ICOLD-a) [6],[7]. Brana Botonega je nasuta kamena brana s nepropusnom jezgrom od prirodnih materijala (glinena jezgra) te djelomičnim temeljnim klinom kako bi se osigurala vodonepropusnost tijela i temelja brane. Njezina svrha je trostruka: koristi se u svrhu zaštite od štetnog djelovanja vode (sprečavanje

poplava i protuerozijske mjere), kao zahvat vode (vodoopskrba), te kao vodni resurs za navodnjavanje površina u Srednjem i Donjem dijelu sliva rijeke Mirne. Bitno je napomenuti da se, zbog nedostatnih zaliha vode, akumulacija ne koristi za navodnjavanje. Preljev (konstruiran kao bočni preljev i udaljen od krune brane) i temeljni ispušt brane Botonega prolaze kroz tijelo brane, te su izvedeni od betona [8],[9],[10].

Osnovne pretpostavke i pojednostavljenja koja su prilikom izrade matematičkog modela usvojena, kako bi se umanjila kompleksnost izračuna, su:

- homogen poprečni presjek (laporovita glina – nepovoljni slučaj);
- pojednostavljenje geometrije poprečnog presjeka;
- izostavljanje vremena potrebnog za stvaranje početnog otvora na kruni brane;
- oblik početnog otvora pravilnog trapeza s kutom pokosa $\gamma = 26.57^\circ$;
- uspostavljanje protoka vode kroz početni otvor označava trenutak u kojem započinju erozijski procesi na kruni brane;
- zanemarivanje neravnina koje nastaju na nizvodnom pokosu brane pod utjecajem erozije, aproksimirano ravnom površinom;
- kritični kut nizvodnog pokosa i bočnih pokosa u otvoru brane β_1 u rasponu od 80° do 90° ;
- neerodibilni temelj brane;
- ne uzimanje u obzir hidrološko-hidrauličke promjene stanja vodnih zaliha u akumulaciji uslijed dinamike istjecanja vodnih količina prilikom procesa erozije tijela brane.

S obzirom na pretpostavke i pojednostavljenja koja su uvedena kako bi modeliranje postepenog djelomičnog proloma brane bilo jednostavnije, izrađen je proračun koji je dao sljedeće rezultate:

- kao rezultat, ukupno vrijeme potrebno da se dogodi postepeni djelomični prolom brane, iznosi $t = 3,31$ sati. Ukupno vrijeme jednako je zbroju vremena potrebnih da se dogodi svaka od pet faza;
- vrijeme potrebno da se dogodi svaka od pet faza postepeno djelomičnog proloma brane prikazano je u *Tablici 1*.

Tablica 1. Tablični prikaz potrebnog vremena da se kroz pet faza dogodi djelomični prolom brane Botonega i protoka vode kroz otvor na brani na kraju svake faze

	Vrijeme [sati]	Protok vode kroz otvor na kraju faze [m ³ /s]
I Faza	2,49	≈ 28
II Faza	0,58	≈ 28
III Faza	0,08	≈ 1342
IV Faza	0,15	≈ 3988
V Faza	0,01	≈ 837
UKUPNO:	3,31	

Unutar proračuna, uz računanje vremena potrebnog da se dogodi postepeni djelomični prolom brane, računata je i dimenzija otvora brane te protok koji se kroz pet faza ovog proračuna postupno povećavaju. Protok vode je kroz faze prikazan u *Tablici 1*.

Dimenzije otvora kroz tijelo brane koji nastaje na kraju postepenog djelomičnog rušenja brane su sljedeće:

- širina otvora brane pri dnu $b=39,43$ m
- širina otvora brane pri vrhu krune brane $B=39,62$ m
- dubina otvora brane $d=19,70$ m
- kut nagiba bočnih pokosa otvora (kritični nagib) $\beta_l = 89^\circ 43'$

4. Zaključak

Cilj ovoga rada bio je prikazati mehanizme vezane za postepeni djelomični lom brane i dati primjer izračuna.

Brane su hidrotehnički objekti koji najčešće služe za formiranje akumulacija potrebnih u sustavima vodoopskrbe, zaštite od poplava i energetike. Zbog velikih količina vode koje se zadržavaju u akumulacijama, eventualno nekontrolirano prelijevanje ili rušenje brana može izazvati formiranje poplavnog vala velike razorne moći. Nasute brane se mogu urušiti zbog cijelog niza različitih uzroka, no najčešći su prekoračenje hidrauličke stabilnosti brane (unutrašnja erozija i regresivna erozija) i prelijevanje brane.

Iako je za nasute brane vjerojatnost pojavljivanja trenutnog potpunog loma mala, i one su se obično računale pod pretpostavkom takvog mehanizma rušenja kao najnepovoljnijeg rješenja, ozakonjenog u pravnoj regulativi donesenoj 1975. godine.

Mnogo izgledniji mehanizam loma kod nasutih brana je postepeni djelomični lom brane, prilikom kojeg se brana ne urušava u potpunosti već na tijelu brane nastaje veliki otvor, pa je u ovom radu rušenje brane prikazano pod tom pretpostavkom.

Nasute brane su nepreljevne u smislu prelijevanja preko krune brane. Koriste se bočni, bunarski preljevi i sl. Prelijevanje preko nasute brane, pogotovo ukoliko je ono dugotrajno rezultira erodiranjem nizvodnog pokosa što može rezultirati rušenjem brane.

Da se spriječi prelijevanje potrebno je dobro odrediti visinu krune brane, odrediti mjerodavni vodni val (velike vode) koji akumulacijski bazen iza brane mora prihvatiti, dimenzionirati, izvesti i održavati evakuacijske organe.

Rezultati dobiveni ovim proračunom su:

- vrijeme potrebno da se dogodi postepeni djelomični prolom brane $t = 3,31$ sati
- širina otvora brane pri dnu $b = 39,43$ m
- širina otvora brane pri vrhu krune brane $B = 39,62$ m
- dubina otvora brane $d = 19,70$ m
- kut nagiba bočnih pokosa otvora (kritični nagib) $\beta_1 = 89^\circ 43'$

Uzimajući u obzir pomanjkanja podataka i usvojenih pojednostavljenja, rezultate ne možemo uzeti kao točne projektne vrijednosti. Razvojem ovoga proračuna u budućnosti te njegovom provjerom kroz istraživanja na fizikalnim modelima i u prirodi biti će moguće proračun usvojiti mjerodavnim

U stvarnosti, vrijeme potrebno za prolom brane bi zasigurno bilo i veće a dimenzije otvora kroz tijelo brane manje, što slijedi iz činjenica [9],[10]:

- brana Botonega ima heterogen poprečni presjek sastavljen i od materijala otpornijih na djelovanje erozije, te je realno očekivati da će erozijski procesi trajati duže vrijeme
- otvor koji se stvara na kruni brane nema u stvarnosti oblik pravilnog trapeza, te su obično sve površine pod utjecajem erozije ispunjene neravninama;
- zaštitni pokrov nizvodnog pokosa brane, kao što je zatravnjivanje utječe na procese erozije (posebno na nastajanje erozije) tako da je ono sporije;
- u dinamičkim procesima kao što je stvaranje otvora na kruni brane ili prolom nasute brane, visina preljeva može dostići i čak prekoračiti mehaničku granicu stabilnosti tla, pa tako i viši i strmiji pokos od kritičnog

kuta β , može ostati stabilan neko određeno vrijeme prije nego se uruši (ne mora biti u granica od 80° do 90°);

- erozija na nizvodnom pokosu brane ne započinje u trenutku kada je uspostavljen protok kroz otvor brane, već je potrebno vrijeme da se erozijske sile razviju do te mjere da započnu erodirati nizvodni pokos brane;
- s obzirom da je temelj brane u stvarnosti erodibilan moguće je u realnosti očekivati veće dimenzije otvora.

5. Literatura

- [1] Barbara Karleuša; *Predavanja iz kolegija Hidrotehničke građevine*; Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci; Rijeka, 2007.
- [2] Goran Gjetvaj, Goran Lončar, Krešimir Plantić; *Istraživanja posljedica uslijed iznenadnog prelijevanja ili rušenja visokih brana na fizikalnom modelu*; Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Zagreb; listopad 1998.: Izvj. Br.: 509.
- [3] H.J. Steetzel and J.H. De Vroeg; *Extension and validation of the BREACH – model*; Alkyon/ Delf Hydraulics for Rijkswaterstaat /DWW; Delf, Netherlands, 1998.: Tehnical report A094R1r2.
- [4] P.J. Visser; *Breach growth in sand-dikes. PhD thesis*; Delft University of Technology; Delft; the Netherlands, 1998.
- [5] Yonghui Zhu; *Breach Growth in Clay – Dikes*; Hohai University geboren te Hunan; China; 2006.
- [6] <http://www.wikipedia.com>; 2009.
- [7] <http://www.elektroprojekt.hr/hdvb/katastar>; 2009.
- [8] Vulić Željko; *Akumulacija Botonega, Inženjerskogeološki radovi, Izvještaj*; Fond stručne dokumentacija IGH El. Br.:204/1971; Zagreb; 1971.
- [9] Branimir Muller; *Akumulacija Botonega, Glavni projekt nasute brane (prilog Knjigama 5 i 6)*; Fond stručne dokumentacije Geotehnike El. Br.: 20-804.2/80; Zagreb; 1980.
- [10] Mihajlo Ćuk; *Akumulacija Botonega, Brana Botonega; Završni izvještaj o geomehaničkoj kontroli ugradnje materijala tijekom građenja brane Botonega*; Fond stručne dokumentacije Geotehnike El. Br.:804.2-490/87; Zagreb; 1987.

Analiza vodnog režima Vranskog jezera u Dalmaciji

Water Regime Analysis of Lake Vrana in Dalmatia

Ana Šuljić*, Josip Rubinić**

Sažetak. U radu je analiziran hidrološki sustav Vranskog jezera pokraj Biograda na Moru. Po površini je to najveće jezero u Hrvatskoj. Jezero je plitka kriptodepresija, a od mora ga razdvaja samo tanki hrbat širine 800-2 500 metara. Davne 1770. godine jezero je izravno povezano s morem prokopavanjem kanala Prosika, s ciljem smanjenja visokih voda i plavljenja područja Vranskog polja. Osim ove izravne veze s morem, komunikacija jezero-more odvija se obostrano putem podzemnih kanala krškog vodonosnika. U kritičnim sušnim godinama, izraženi su prodori mora u jezerski krški vodonosnik pa i samo jezero. Time se ugrožava posebno vrijedni jezerski ekosustav, zbog čije je vrijednosti 1999. godine dio Vranskog jezera s okolnim područjem proglašen Parkom prirode.

Stabilnost ekosustava Vranskog jezera ugrožavaju aktualne klimatske promjene – prisutni trendovi smanjenja oborina i dotoka, te trendovi povećanja razine mora. Zbog njihova je utjecaja posljednjih godina, a posebno 2008. godine došlo i do izrazitijih zaslanjenja jezera. Stoga je, da bi se uopće moglo razgovarati o metodama zaštite od zaslanjivanja jezera, u ovom radu provedena analiza mehanizama koji karakteriziraju ponašanje jezera i njegov vodni režim. Prikazane su opće značajke sustava i vodnog režima jezera s ciljem utvrđivanja ukupne količine raspoloživih voda te njihovog prostornog i vremenskog rasporeda. Provedene su analize utjecajnih klimatoloških i hidroloških značajki, kao i godišnjeg i unutargodišnjeg hoda, te na duljoj vremenskoj skali i njihovih trendova. Provedene su analize dinamike kolebanja razine vode u jezeru, analize recesijskih razdoblja, kao i procjena vodne bilance – režima dotoka i oštećenja iz jezera.

Ključne riječi: Vransko jezero – Dalmacija, krš, hidrološke analize, vodna bilanca.

* Hrvatske vode, Đure Šporera 3, 51 000 Rijeka
e-mail: ana.suljic@voda.hr

** Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, V. C. Emina 5, 51 000 Rijeka
e-mail: jrubic@gradri.hr

Abstract. The paper deals with the hydrological system of the Vrana lake which is situated near Biograd na Moru. By its surface the Vrana lake is the largest lake in Croatia. It is a shallow cryptodepression, separated from the sea only by a narrow 800 – 2 500 m wide ridge. Already in 1770 the lake was directly connected to the sea by the canal Prosika whose function was to reduce the high waters and overflowed areas of the Vrana field. In addition to this direct communication with the sea, another one is reciprocally performed through underground canals of the karst aquifer. During the critical draught years the reverse communication is prominent – the sea intrusions into the lake karst aquifer and the lake itself. This endangers the particularly valuable lake eco-system whose significance resulted in declaring a part of the Vrana lake with its surroundings a nature park in 1990.

The Vrana lake eco-system stability is endangered by the current climate changes – the present precipitation and inflow reduction trends and the sea water level increase trends. Due to their influence, the more prominent salinization of the lake has occurred in the past few years, especially in 2008. In order to be able to discuss the salinization protection methods at all, in this paper an analysis of mechanisms which mark the lake behaviour and its water regime has been conducted. The general characteristics of the system and the lake water regime have been analysed in order to establish the total amount of water at disposal and its spatial and time arrangement. The analyses of influential climate and hydrological characteristics as well as the annual and intra-annual rate and their trends have also been conducted in a longer time scale. The lake water level variation dynamics analyses and the recession period analyses as well as the water balance assessment – the lake inflow and outflow regime – have been also conducted.

Key words: Lake vrana – Dalmatia, karst, hydrological analyses, water balance

1. Uvod

Priobalni krški vodonosnici predstavljaju osjetljive hidrološke sustave. Takav je i sustav Vranskog jezera pokraj Biograda na Moru (Slika 1). Godine 1770. prokopan je kanal Prosika te je jezero izravno povezano s morem u cilju odvodnje zamočvarenog područja kojim je formirano Vransko polje. Tijekom 20 stoljeća izgrađen je hidromelioracijski sustav. Komunikacija jezero-more također se odvija i putem podzemnih kanala priobalnog krškog vodonosnika, te jezero oduvijek karakteriziraju oscilacije u sadržaju zaslanjene morske vode [1].

Jezero ugrožavaju aktualne negativne klimatske promjene (povećanje temperatura zraka i smanjenje oborina, a posljedično s time i smanjenje dotoka u sustav Vranskog jezera), te posljednjih godina dolazi do češćih i izrazitijih zaslanjenja jezerske vode. Da bi se mogle analizirati moguće metode zaštite od zaslanjenja, potrebno je izučiti hidrološke mehanizme koji karakteriziraju ponašanje jezera. U ovome radu analizirane su opće hidrološke značajke vodnog režima Vranskog jezera s ciljem utvrđivanja prostorno-vremenskog rasporeda vodnih zaliha.

Upravo su spomenute negativne posljedice zapaženih promjena inicirale povećani znanstveni i stručni interes za Vransko jezero tijekom posljednjih nekoliko godina, u sklopu čega je i izrađen diplomski rad Šuljić [2] na temelju kojega, kao i rada Rubinića i ostalih [3], je i pripremljen dani rad.



Slika 1. Pogled na Vransko jezero iz zraka [4]

2. Opće značajke Vranskog jezera

Područje Vranskog jezera omeđeno je sa SI strane Velebitskim masivom, a s JZ strane Jadranskim morem. Geografski pripada srednjoj Dalmaciji, a administrativno Zadarskoj i manjim dijelom Šibenskoj županiji [5].

Vransko jezero je površinom najveće prirodno jezero u Hrvatskoj. Površina mu se kreće u rasponu od 29,8-30,2 km². Dugačko je 13,6 km a široko od 1,4-2,4 km. Pruža se paralelno s morskom obalom (smjer SZ-JI) i od mora ga dijeli vapnenački greben širok 800-2 500 m. Nastanak jezera povezuje se s promjenom razine mora te se smatra da je ono zapravo potopljeno krško polje [6]. Po međuodnosima razine mora, te površine i dna jezera, Vransko jezero je kriptodepresija. Najpliće je na SZ dijelu gdje mu je dubina 0,5-1 metar. Prema JI postaje dublje te doseže dubinu od 4-6 m. Zbog plitkoće, voda jezera podložna je naglim promjenama temperature ovisno o temperaturi zraka (veljača 2,9 °C; srpanj 25,2 °C). Jezero je blago bočato sa salinitetom od 0,16-0,86‰. Po klimatskim karakteristikama pripada mediteranskom tipu klime s blagim, kratkotrajnim i kišovitim zimama, te suhim i vrućim ljetima.

Jezero je neposredno spojeno s morem 1770. godine kada je prokopan 840 metara dug kanal Prosika. Kanal je kasnije više puta proširivan i produbljivan. Danas je kota dna prokopa na 0,43 m n.m., a razina vode u jezeru varira od minimalno izmjerenih 0,03 m n.m. (1990. i 2008.) do maksimalnih 2,24 m n.m. (1974. i 1994.). Prokopavanjem kanala i melioracijom nekadašnjeg Vranskog polja došlo je do redukcije poplavnih zona i močvarnih staništa. Posljedica toga je smanjenje dubine jezera, ubrzana eutrofikacija, te negativan utjecaj na riblji fond i podvodnu vegetaciju. Smanjena je plovnost jezera, a zaslanjenje vode onemogućava njezinu upotrebu u navodnjavanju [7]. Jezero je pri istraživanjima 60-ih godina bilo oligotrofno, ali je danas po kvaliteti mezotrofno [1].

Površina sliva Vranskog jezera i polja iznosi 470 km² te zauzima središnji dio Ravnih kotara (Slika 1). Unutar sliva izdvojena su 4 podsliva: Kotarka (131 km²), Tinj – Kakma – Stabanj (122 km²), Kličevica (50 km²) i Živača (167 km²) (Fritz, 1984.). Hidrografska mreža velikom dijelom je posljedica melioracijskih zahvata.

Jezero ima aktivnu dvostruku komunikaciju s morem. Neposredna komunikacija je putem kanala Prosika gdje voda uglavnom istječe, ali je za sušnih razdoblja moguć i utok. Posredna komunikacija odvija se kroz krški vodonosnik kroz nekoliko grupa izvora [3].

Sustav Vranskog jezera karakteriziraju recentne nepovoljne hidrološke prilike s pojačanim prodorima morske vode u jezerski sustav (najizrazitije 2007. i 2008.). Godine 2009. od strane Hrvatskih voda provedeno je podizanje praga istjecanja iz jezerskog sustava. Podizanjem dna praga na minimalnu kotu od +0.80 m n.m., odnosno srednju kotu praga od 0,85 m n.m., za oko 0,50 m, povećan je volumen vode u jezeru prije njegova prelijevanja u more za čak oko 15 mil. m³ vode, odnosno u odnosu na ukupni volumen vode u jezeru čak nešto više od 15% [8].

3. Metodologija provedenih obrada

Predmet obrada u danom radu je analiza hidroloških značajki Vranskog jezera. Analiza se temelji na statističkim obradama mjerenih hidroloških i meteoroloških podataka s promatranog prostora. Početni korak u provedenim analizama bila je statistička obrada osmotrenih podataka. Pri tome, od osnovnih statističkih parametara analiziraju se: aritmetička sredina, standardna devijacija, koeficijent varijacije te se registriraju ekstremi. Dostatnost duljina analiziranih nizova provjerava se na osnovu veličine pogreške, a koja je ovisna o varijaciji njihovih osmotrenih vrijednosti [9].

Analizirane su i krivulje učestalosti i trajnosti osmotrenih nizova podataka. Pri tome učestalost neke vrijednosti slučajne varijable predstavlja broj koji pokazuje koliko puta se ta vrijednost varijable pojavila u analiziranom razdoblju

[7]. Krivulja trajanja je krivulja koja pokazuje postotak vremena tijekom kojeg je varijabla jednaka danim veličinama ili veća od njih bez obzira na kronološki red.

Korelacijskom analizom određuje se mjera jakosti povezanosti među varijablama. Povezanost se izražava koeficijentom korelacije R koji se kreće u rasponu od $-1 < R < 1$. Autokorelacijom se definira tromost sustava.

U radu su provođene jednostruke i višestruke regresijske analize, pri čemu su ispitivane veze zavisne varijable Y s nezavisnom varijablom X , odnosno nezavisnim varijablama $X_1, X_2 \dots X_n$ pri višestruko regresijskim analizama. U ovome radu regresijska analiza ograničena je na linearnu povezanost, dakle na funkciju oblika $y = f(x) = ax + b$ [10].

Pod analizom recesijskih krivulja podrazumijeva se analiza opadajuće grane hidrograma u razdoblju bez oborina. Pod pretpostavkom da je pražnjenje uvjetovano samo utjecajem efektivne poroznosti i gravitacije, recesijske krivulje pružaju uvid u režim pražnjenja sliva. Za matematičko opisivanje krivulje u ovom radu koristi se Mailletova formula eksponencijalnog oblika koja, iako vrlo jednostavna, dobro aproksimira ocjeđivanje površinskih i podzemnih rezervi u slivu [11].

U analizi recesijskih značajki najprije se analiziraju dugotrajnija razdoblja opadanja histograma za svaku godinu. Potom se ti isti grafovi transformiraju u semi-logaritamsko mjerilo koje omogućuje linearizaciju prikaza eksponencijalnih funkcija. Traži se točka infleksije, tj. točka otklona krivulje od pravca s čijim se oblikom opadajuća grana hidrograma dobro podudara. Dijagrami pokazuju u odnosu na eksponencijalnu funkciju linearnog oblika manje ili veće oscilacije od pravca. Razlog tome su promjene u mikrorežimu istjecanja ili manje količine padalina. Smatra se kako one ne utječu bitnije na opći tijek pražnjenja jezera.

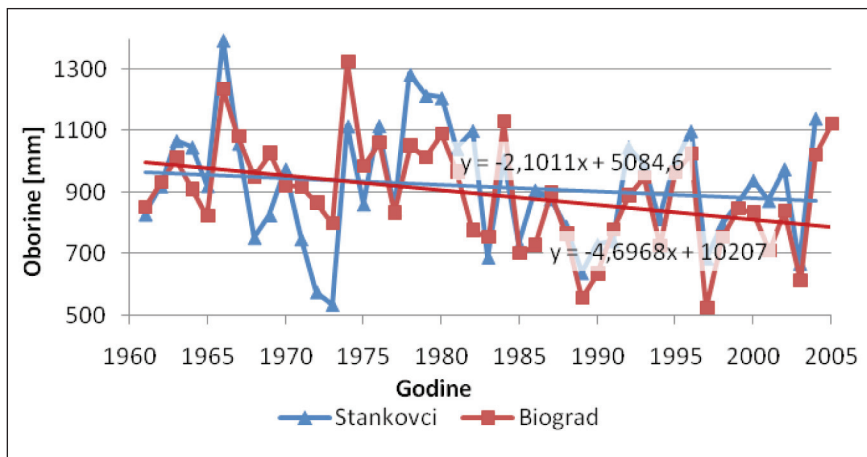
Bilanciranje voda temelji se na općem zakonu o očuvanju masa koji govori da je masa zatvorenog sustava konstantna, bez obzira na procese unutar samog sustava [12]. Bilanciranje voda u slivu je računanje promjena zaliha vode u nekom vremenu i na nekoj površini. Vodna bilanca sliva u duljem vremenskom razdoblju, ako u njemu nije došlo do značajnih klimatskih i geoloških promjena, trebala bi biti jednaka nuli.

4. Rezultati provedenih obrada

4.1. Obrade meteoroloških podataka – oborine

Za analizu oborina Vranskog jezera odabrane su meteorološke stanice Biograd (1961.-2005.) i Stankovci (1961.-2004.) jer se smatra da po svom prostornom rasporedu (locirane su na širem području sliva sa suprotnih strana jezera) dobro opisuju oborinske značajke promatranog prostora. Nad spomenutim podacima

provedena je osnovna statistička analiza. Generalni zaključak je da se prema godišnjoj količini oborina za slivno područje Vranskog jezera može reći da je razmjerno bogato oborinama (Slika 2). Oborine su češće u hladnom nego u toplom dijelu godine. Pritom je u prosjeku najviše padalina u mjesecu studenom. Česte su i oborine početkom proljeća, te se sekundarni maksimumi javljaju u travnju. Srpanj je najsušniji mjesec u godini. Godišnji hod količina oborina na obje stanice pokazuje trend smanjenja godišnjih količina oborina. Spomenuti trend izraženiji je na stanici Biograd.



Slika 2. Godišnji hod oborina na meteorološkim stanicama Biograd i Stankovci

Za navedene stanice provedena je i regresijska analiza, te je kao rezultat dobiven regresijski koeficijent vrijednosti $R=0,730$ koji govori o relativno čvrstoj povezanosti podataka između mjernih stanica.

4.2. Obrade hidroloških podataka

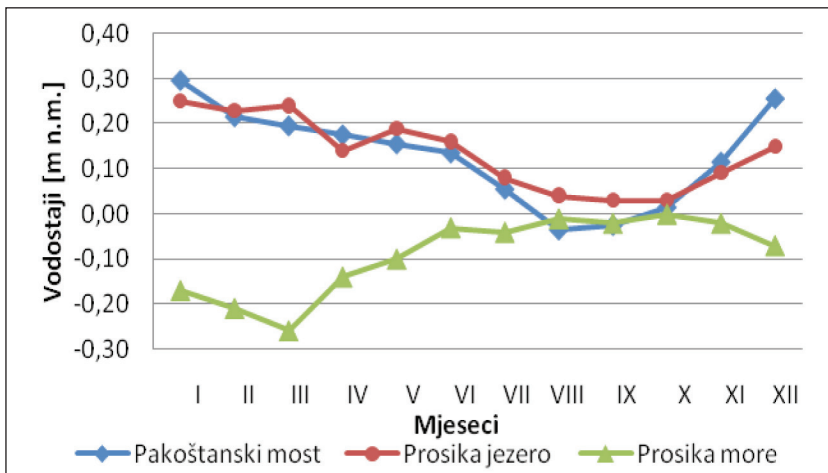
Hidrološke mjerne stanice na slivu Vranskog jezera karakterizira neujednačenost u održavanju mjernih presjeka, bujna vegetacija i velika zaraštenost, a česte su i promjene lokacija stanica, promjene položaja i vrste mjernih uređaja te povremeni prekidi opažanja [5]. Na slivu je aktivno 9 hidroloških stanica: Pakošanski most i Prosika na samome jezeru, Prosika na Jadranskome moru, Benkovac na Kličevici, Jankolovica na Glavnom kanalu, Burski most na Jablanskom kanalu, Oporičev most na Pećini, Vrana na Lateralnom kanalu, te Vrana na Škorobiću. Stanica Prosika na Jadranskom moru opaža razinu mora, te je zapravo mareograf. U većini provedenih analiza koriste se podaci sa 3 mjerne stanice: Pakošanski most i Prosika na Vranskom jezeru te Prosika na Jadranskome moru. Podaci preostalih 5 stanica korištene su tek pri bilansnoj analizi.

4.2.1. Analize vodostaja

Za analizu vodostaja koristili su se podaci sa postaja Pakošanski most (1947.-2006.), Prosika jezero (1948.-2008.) i Prosika more (1986.-2008.).

4.2.1.1. Usporedba minimalnih mjesečnih vodostaja

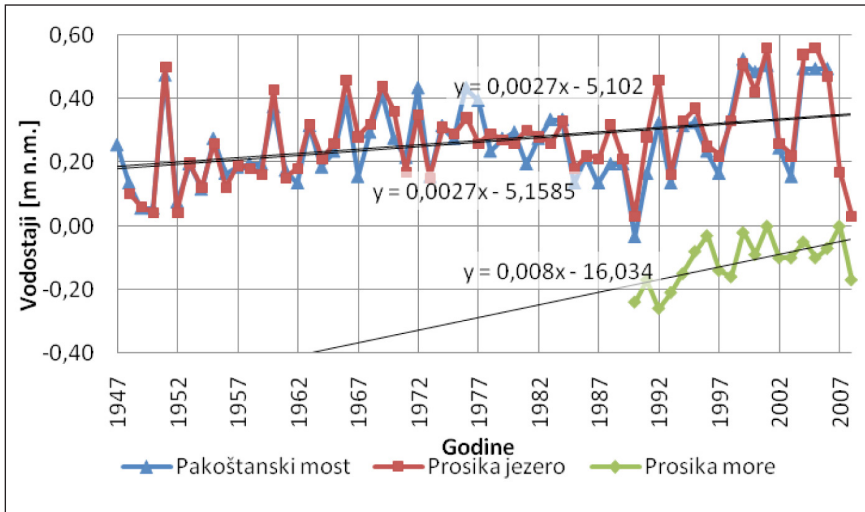
Usporedba apsolutnih minimuma registriranih mjesečnih podataka vodostaja ukazuje na ponašanje koje je nepovoljno za samo jezero (Slika 3). Stanice locirane na jezeru ponašaju se vrlo slično, dok se u usporedbi sa stanicom Prosika more ponašaju obrnuto proporcionalno. Maksimalne zimske vrijednosti vodostaja jezera popraćene su minimalnim razinama mora, ali su i minimalni ljetni vodostaji jezera praćeni maksimalnim razinama mora. Stanica Pakošanski most u razdoblju kolovoz – rujan poprima čak i negativne vrijednosti. U isto vrijeme morska razina poprima maksimalne vrijednosti, te je viša od vrijednosti razine vode na Pakošanskom mostu. Vrijednosti vodostaja na postaji Prosika jezero cijelo su vrijeme više od razine mora, najvjerojatnije zbog kraćeg razdoblja obrade unutar koga nisu bili registrirani najveći ekstremi. Minimalne razlike jezerske i morske razine javljaju se u razdoblju od kolovoza do listopada i kreću se u vrijednostima od 5 do -2.5 cm.



Slika 3. Apsolutni minimalni mjesečni vodostaji za razdoblje od 1947.-2008.

4.2.1.2. Usporedba minimalnih godišnjih vodostaja

Godišnji hod minimalnih vodostaja svih stanica i njihovi trendovi prikazani su na Slici 4. Stanice locirane na jezeru pokazuju slično ponašanje. Trendovi su im uzlazni, gotovo identični te se preklapaju na grafu. Stanica Prosika more bilježi manje oscilacije od onih prisutnih na jezeru, a trend joj je također uzlazan.

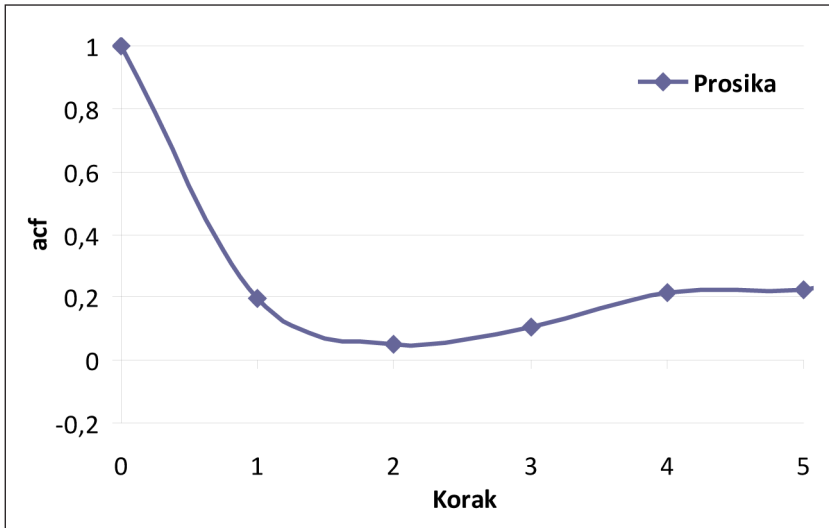


Slika 4. Minimalni godišnji vodostaji za razdoblje 1947.-2008.

Za analizirane postaje provedena je i regresijska analiza kojom se pokušava pokazati njihova međuovisnosti. Regresijska analiza podataka s postaja Pakošanski most i Prosika jezero dala je koeficijent determinacije $R=0,912$, a koji predstavlja izrazito čvrstu vezu. Ovo je očekivani rezultat jer je već ranije utvrđeno da se stanice na jezeru ponašaju slično. Zanimljiviji je međudnos stanica na jezeru i stanice Prosika more. Dostupni podaci su relativno kratki pa rezultate treba uzeti s određenom dozom sigurnosti. Analiza stanica Pakošanski most i Prosika more daje regresijski koeficijent u iznosu $R=0,640$ i on predstavlja slabu korelacijsku vezu (u hidrologiji se općenito smatra da se korelacijski odnos može koristiti ako je $|R| \geq 0,60$). Neočekivano, analiza stanica Prosika jezero i Prosika more dala je još manji koeficijent od svega $R=0,430$. Taj koeficijent ukazuje da je korelacijski odnos naznačen ali najvjerojatnije nema praktične vrijednosti za daljnje analize.

4.2.1.3. Analiza autokorelacijske funkcije

Na temelju minimalnih godišnjih podataka o vodostajima zabilježenim na postaji Prosika jezero za razdoblje 1994.-2008. provedena je njihova autokorelacijska analiza (Slika 5). U krškim hidrološkim sustavima obično je naglašena povezanost aktualnih događaja (stanja) s prethodnima. Autokorelacijska funkcija nam ukazuje na to “pamćenju” sustava. Smatra se da se granična vrijednost tromosti sustava dostiže presjekom sa ordinatom vrijednosti 0,2.

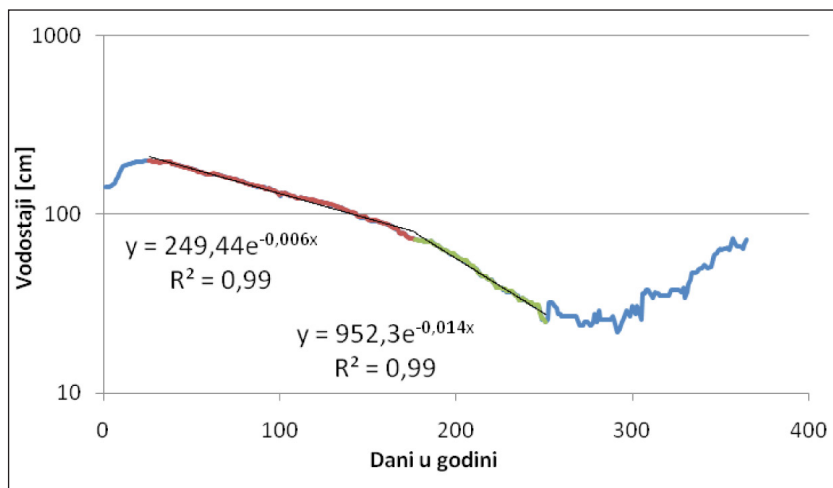


Slika 5. Autokorelacijska funkcija srednjih godišnjih minimalnih vodostaja stanice Prosika jezero (1948.-2008.)

Iz Slike 5 se vidi da Vransko jezero nema veliku tromost te brzo reagira na aktualna stanja. Već u prvome koraku funkcija dostiže vrijednost 0,2 što govori da jezero karakterizira relativno slaba tromost sustava od svega godinu dana. To predstavlja za jezero vrlo nepovoljnu situaciju, jer znači da će u slučaju izrazito sušne godine, jezero odmah reagirati padom vodostaja, odnosno da nema na raspolaganju većih vodnih rezervi.

4.2.1.4. Višestruka regresijska analiza recesijskih krivulja – krivulja opadanja razina vode u Vranskom jezeru

Za provedbu predmetne analize uzeti su u obradu podaci o kolebanjima vodostaja u Vranskom jezeru od 1948.-2008. g., prilikom čega su izdvojena razdoblja s dugotrajnijim sezonskim opadanjima razine vode u jezeru (npr. Slika 6), a za koja su dane aproksimacije dinamike promjene te razine po eksponencijalnoj krivulji pražnjenja. Tijekom dugotrajnijih razdoblja pražnjenja uočene su i promjene u toj dinamici, pa su stoga, kao i u danom primjeru, izdvajana i kraća podrazdoblja sa vlastitim funkcijama opadanja.



Slika 6. Opadanja razine vode u Vranskom jezeru tijekom 2003. g.

Dobiveni rezultati analize dinamike pražnjenja su sistematizirani, te je nad njima provedena višestruka linearna regresijska analiza. Njome se pokušava procijeniti u danju analizi zavisnu varijablu (indeks α u eksponencijalnoj funkciji $y=Ae^{-\alpha x}$) na temelju poznatih vrijednosti nezavisnih varijabla. Za nezavisne varijable uzeti su sljedeći parametri recesije: početak (x_1) i završetak (x_2) razdoblja recesije izraženi rednim brojem dana po julijanskom kalendaru, trajanje (x_3) recesijskog razdoblja (izraženo u danima), njima pripadni početni (x_4) i završni (x_5) vodostaji pojedinog recesijskog razdoblja (izraženi u cm), te srednja razina vodostaja tijekom analiziranog recesijskog razdoblja (x_6) izražena centimetrima.

Analizom međuovisnosti koeficijenta dinamike pražnjenja α i spomenutih utjecajnih parametara, dobivene su jednadžbe sljedećeg oblika (1 i 2):

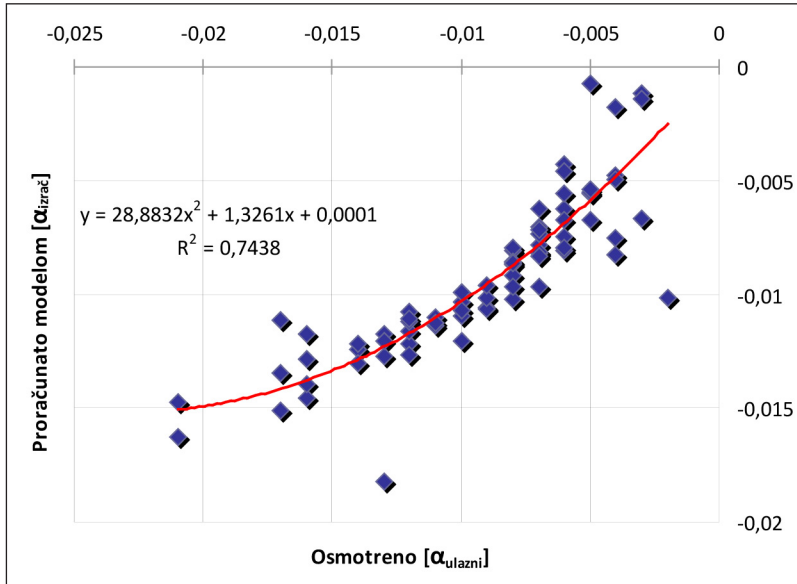
$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6 \quad (1)$$

$$y = -0,01762 + 0,00000x_1 + 0,00000x_2 - 0,00030x_3 - 0,00034x_4 + 0,00043x_5 - 0,00000x_6 \quad (2)$$

Iz dobivene jednadžbe vidi se da je najveći koeficijent pridružen varijabli završnog vodostaja (x_5). To govori da najveći utjecaj na veličinu indeksa ima završna razina vode u jezeru. Početnom vodostaju i trajanju recesijskog razdoblja pridruženi su slični koeficijenti te u sličnoj mjeri utječu na vrijednost indeksa. Varijablama koje govore o vremenu javljanja razdoblja recesije (x_1 i x_2) i srednjoj razini analiziranog razdoblja (x_3) pridružena je vrijednost 0, što znači da njihov utjecaj slobodno može biti zanemaren, tako da kao konačnu dobivamo jednadžbu (3):

$$y = -0,01762 + -0,00030x_3 - 0,00034x_4 + 0,00043x_5 \quad (3)$$

Na Slici 7 prikazana je usporedba indeksa α dobivenih ulaznim podacima i višestrukom regresijskom analizom. Vidljivo je da vrijednosti indeksa α dobiveni regresijskom analizom pokazuju relativno čvrstu korelacijsku vezu s koeficijentima pražnjenja dobivenim recesijskom analizom te koeficijent determinacije iznosi visokih $R^2=0,74$.



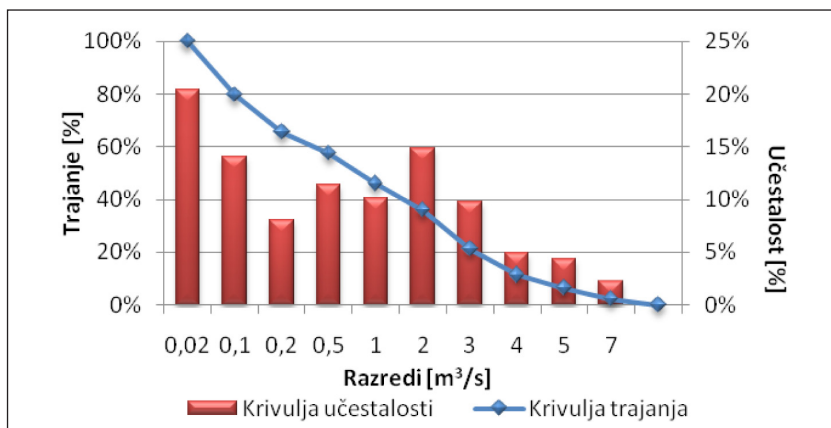
Slika 7. Usporedba mjerenih i modelskom analizom proračunatih veličina indeksa α (indeksa dinamike opadanja razine vode u Vranskom jezeru)

4.2.2. Analize protoka

U ovom poglavlju korišteni su podaci o vrijednostima dnevnih protoka na mjernoj stanici Prosika jezero iz razdoblja od 1981.-1982., te 1996.-2008. Radi se o protokama na mjestu istjecanja iz jezera, transformiranim u odnosu na dolazne vrijednosti uslijed djelovanja volumena jezerskog prostora.

4.2.2.1 Krivulje učestalosti i trajanja

Skup svih dnevnih podataka podijeljen je u 10 razreda nejednakih veličina, te je za svaki razred određena učestalost i trajnost. Dobivenim podacima prikazani su histogram učestalosti i krivulja trajanja (Slika 8).



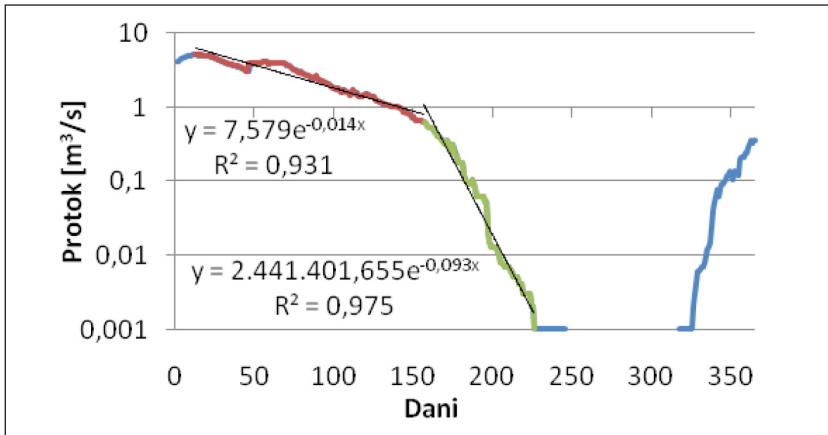
Slika 8. Krivulje učestalosti i trajanja protoka na postaji Prosika jezero

Iz histograma učestalosti vidljivo je da je trećina (34,46 %) podataka u rasponu manjem od $0,1 m^3/s$. Nešto manje od dvije trećine podataka (64,03 %), nalazi se u razredima ispod $1 m^3/s$. Dobiveni rezultati govore da iz jezera neposrednim putem uglavnom istječu vode relativno malih vrijednosti protoka.

4.2.2.2. Analiza recesijskih značajki

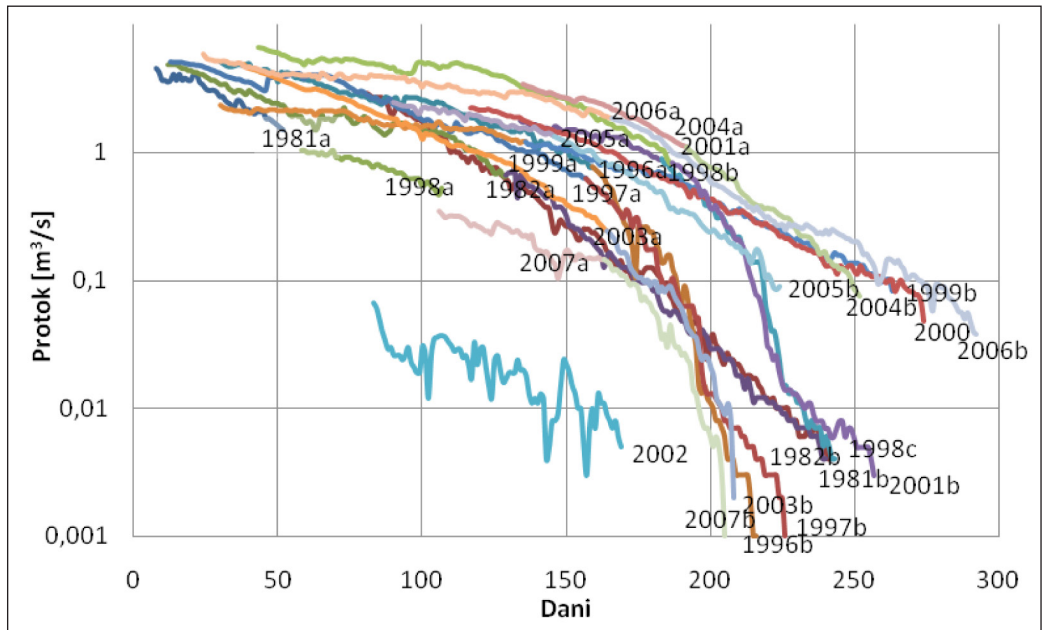
Vodni režim istjecanja iz Vranskog jezera može se zorno prikazati i recesijskim krivuljama, pri čemu su korišteni registrirani podaci o protokama koje istječu kanalom Prosika.

Analizirani su podaci iz razdoblja od 1981.-1982. te 1996.-2008. Recesijska krivulja za 1997. godinu (Slika 9) predstavlja tipičnu recesijsku krivulju Vranskog jezera, i upravo ona pokazuje model kojeg slijedi većina ostalih recesijskih krivulja. Recesijsko razdoblje podijeljeno je na dva dijela, i pritom je prvi dio recesijskog razdoblja označen je slovom *a*, a drugi slovom *b*.

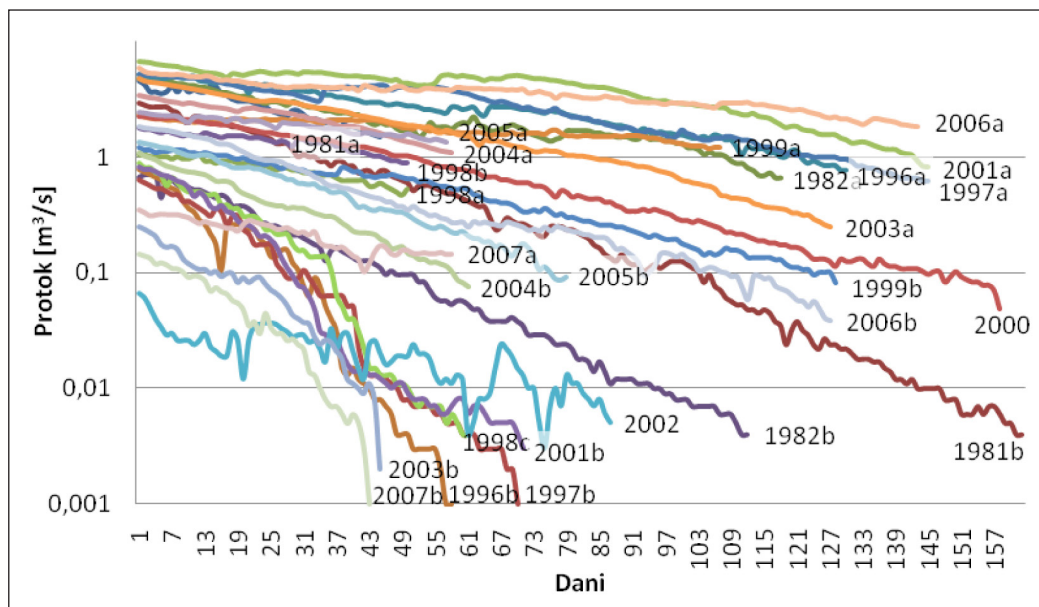


Slika 9. Krivulja recesije istjecanja iz Vranskog jezera kanalom Prosika u 1997. godini

Radi lakše međusobne usporedbe recesijskih krivulja tijekom višegodišnjeg analiziranog razdoblja, krivulje su grafički prikazane na dva načina. Prvi je prikaz krivulja recesije po vremenu pojavljivanja u kalendarsoj godini (Slika 10), a drugi tako da su sve krivulje pomaknute do osi y kao da su sve počele u isto vrijeme (Slika 11). Recesijsko razdoblje je u većini slučajeva podijeljeno na dva dijela, i pritom su prvi dijelovi recesijskog razdoblja označeni slovom *a*, a drugi slovom *b*.



Slika 10. Usporedba krivulja recesije Vranskog jezera po vremenu pojavljivanja u kalendarsoj godini



Slika 11. Usporedba krivulja recesije Vranskog jezera

Iz obrađenih rezultata vidi se da recesijska razdoblja karakterizira velika neujednačenost (Slika 10), tj. različiti režim pražnjenja. Recesijska razdoblja najčešće se javljaju između 100-tog i 200-tog dana. Najranije započeto recesijsko razdoblje javilo se osmog dana u godini (1981.), dok se najkasnije javilo sto devedeset i drugog dana (2004.). Prosječno trajanje recesijskog razdoblja je oko 3 mjeseca, iako su zabilježena i razdoblja duža od 5 mjeseci (1981.), ali i od svega 40-ak dana (2007.).

U većini slučajeva (osim 2000. i 2002.) recesijsko razdoblje može se podijeliti u dva dijela. Na slikama 10 i 11 prvi dio recesijskog razdoblja označen je slovom *a*, a drugi slovom *b*. Ukoliko promotrimo ta dva razdoblja kao jednu krivulju, maksimalno trajanje diže se na čak 268 dana tj. gotovo 9 mjeseci (2006.). Kod dvodijelnih recesijskih krivulja dolazi do neočekivanih rezultata. U pravilu, pri sušnijim hidrološkim prilikama podzemne vodne rezerve prazne se sporije [12]. Znači, očekivana reakcija bila bi strmiji početni dio recesijske krivulje, a sljedeći blaži. Ovdje se je gotovo svake godine javila obrnuta situacija, tj. što je protok bio niži pražnjenje je bilo brže, a koeficijent pražnjenja α veći. Iz Slike 11 vidi se da generalno recesijske krivulje koje počinju većom vrijednosti imaju blaži nagib, a one koje počinju s manjom vrijednošću (manje od ≈ 1 m³/s) imaju veće nagibe. Razlog tome je smanjenje razine vode u Vranskom jezeru, a koje se manifestira i na promjenu konsumpcijskih odnosa – smanjenje količine istjecanja kroz kanal Prosiku, kao i okolnost da se isparavanja vode iz jezera, kao i evapotranspiracija

u slivu obično povećavaju s produljenjem trajanja recesijskih razdoblja tijekom ljetnih sušnih mjeseci.

Najneobičnije ponašanje pokazuje krivulja recesije za 2002. godinu. To je ujedno i krivulja koju karakterizira najniža početna vrijednost protoke. Na Slici 10 pojavljuje se kao jedina krivulja koja ne slijedi okvirnu grupaciju kretanja recesijskih krivulja. Zanimljivo je da, iako spada među krivulje koje počinju malim vrijednostima, karakterizira ju blagi nagib, te je na Slici 11 vidljivo da presijeca ostale krivulje. Razlog tome je okolnost da je tijekom spomenutog recesijskog razdoblja dolazilo i do nešto naglašenijih varijacija, pa i porasta količine istjecanja kanalom Prosika kao posljedicom povećanja dotoka u jezero. Stoga se recesijsko razdoblje tijekom te godine baš i ne može smatrati u dovoljnoj mjeri karakterističnim recesijskim pražnjenjem vodnih rezervi u slivu.

4.2.2.3. Višestruka regresijska analiza recesijskih krivulja

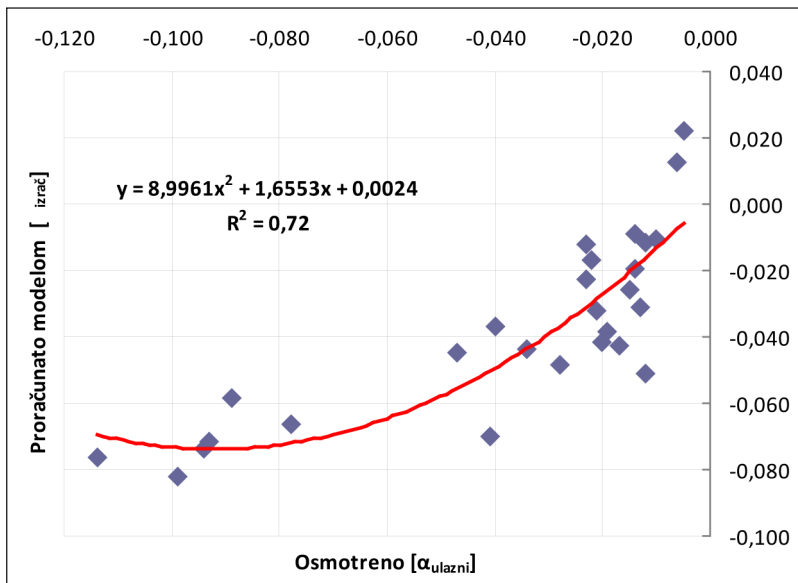
Nad rezultatima dobivenim recesijskom analizom provedena je višestruka linearna regresijska analiza. Njome se pokušava procijeniti zavisnu varijablu (koeficijent pražnjenja α) na temelju poznatih vrijednosti nezavisnih varijabla. Za nezavisne varijable uzeti su sljedeći parametri: početak (x_1), završetak (x_2) i trajanje (x_3) recesijskog razdoblja, te njima pripadni početni (x_4) i završni (x_5) protoci, te početni (x_6) i završni (x_7) vodostaji pojedinog recesijskog razdoblja. Analizom su dobivene jednadžbe (4 i 5) sljedećeg oblika:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6 + a_7x_7 \quad (4)$$

$$y = -0,06943 - 0,00048x_1 + 0,00016x_2 - 0,00030x_3 \dots \\ - 0,01307x_4 + 0,01378x_5 + 0,04943x_6 + 0,01328x_7. \quad (5)$$

Iz dobivene jednadžbe (4) vidi se da je najveći koeficijent pridružen varijabli početnog vodostaja (x_6). To govori da najveći utjecaj na koeficijent pražnjenja ima početna razina vode u jezeru. Završni vodostaj, početni i završni protok imaju slične koeficijente, te u sličnoj mjeri utječu na vrijednost koeficijenta pražnjenja. Varijable koje govore o vremenu javljanja recesije imaju daleko manje koeficijente. Trajanje (x_3) je zanemareno, jer mu je rezultirajuća pridružena vrijednost koeficijenta u regresijskoj jednadžbi jednaka 0.

Nadalje su računane vrijednosti koeficijenata pražnjenja (α) putem jednadžbe dobivene višestrukom linearnom analizom (5). Koeficijenti dobiveni linearnom regresijskom analizom uspoređivani su s vrijednostima koeficijenata pražnjenja dobivenih recesijskom analizom (Slika 12). Regresijski koeficijent iznosi $R^2 = 0,72$, te ukazuje na čvrstu korelacijsku vezu, što nam govori o uspješnosti višestruke regresijske analize.



Slika 12. Usporedba koeficijenata pražnjenja vode iz Vranskog jezera (α) na postaji Prosika jezero

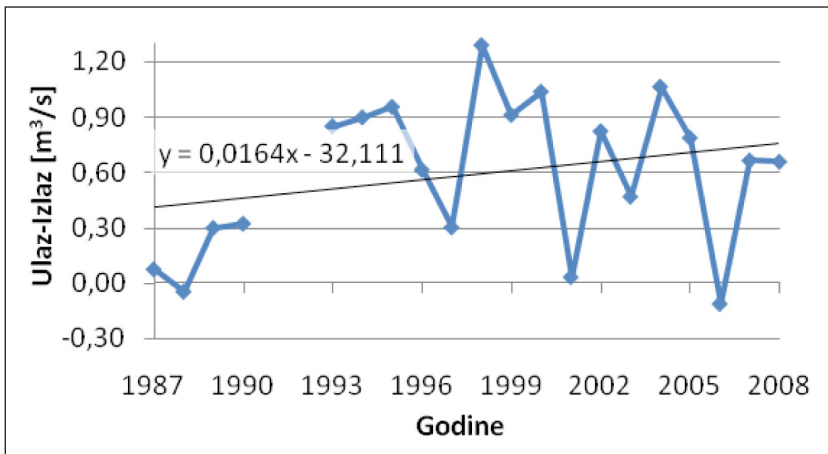
5. Bilanciranje voda

Bilanciranje voda je postupak tijekom kojega se nastoji determinirati i kvantificirati sve dotoke i gubitke iz nekog sustava, u danom slučaju jezera. Bilanciranje voda Vranskog jezera provedeno je na način da se najprije pokušalo utvrditi sve dotoke u jezero. Bilančna analiza temelji se na principu da je suma svih ulaza i izlaza jednaka nuli, i taj princip omogućava da se razlika volumena dotoka i gubitaka (koja u ovom slučaju nije jednaka nuli) shvati kao gubici na poniranje ili kao dotoci podzemnim putem. Bilančna analiza je provedena na godišnjoj razini, a potom i na mjesečnoj.

5.1. Godišnja bilančna analiza

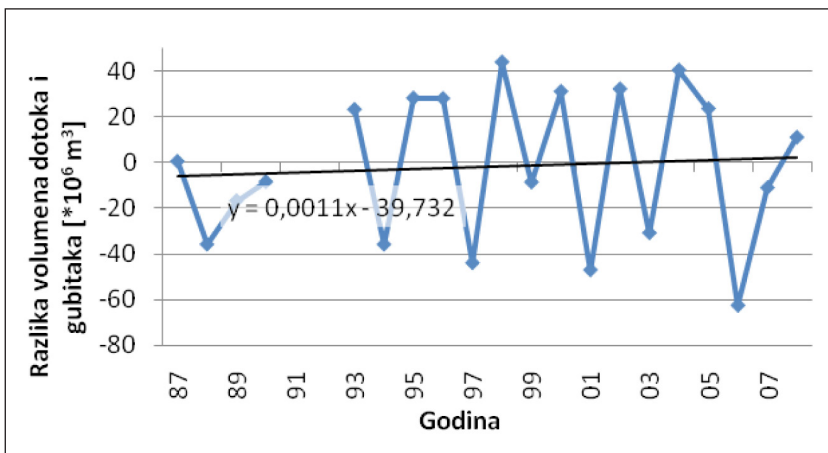
Godišnja bilančna analiza provedena je s podacima za 1987.-2008., s izuzećem 1991. i 1992. godine. Ulazi (protoci) se prate na 5 stanica: Burski most, Jankolovica, Oporičev most, Vrana Škorobići, te Vrana. Podaci o godišnjim protocima bili su nepotpuni, te je najprije provedeno nadopunjavanje podataka korelacijom s ostalim stanicama.

Kretanje razlike ulaza i izlaza u jezero prikazano je na Slici 13, na kojoj se vidi uzlazni trend. U razdoblju od dvadeset godina samo se dvaput javila situacija da su izlazi iz jezera veći od utoka (1988. i 2006.).



Slika 13. Godišnji hod razlike protoka ulaza i izlaza u Vransko jezero (1987-2008.)

Na slici 14 prikazan je godišnji hod razlika volumena dotoka i gubitaka. Pritom razlike volumena dotoka i gubitaka pokazuju iz godine u godinu sve veće oscilacije, te poprimaju vrijednosti od minimalnih -62,72 milijuna m³ (2006.) do maksimalnih 44,30 milijuna m³ (1998.). Napominje se da se u svim godinama najveći gubitak javlja na isparavanju, a riječ je o podacima koji su u ovoj bilančnoj aproksimaciji, zbog nedostatka mjerenih podataka, uzeti s prosječnim vrijednostima sa širih regionalnih prostora te nisu najpouzdaniji element ovog proračuna. Zbog svega navedenog te bi rezultate trebalo uzeti sa određenom dozom sigurnosti.



Slika 14. Godišnji hod razlika volumena dotoka i gubitaka vode s Vranskog jezera (1987.-2008.)

5.2. Mjesečna bilančna analiza

Provedena je i detaljnija mjesečna analiza vodne bilance [8]. Ideja je bila da se i u situaciji kad se ne mogu rasčlaniti nepoznati podzemni dotoci, kao ni podzemni gubitci, promatraju zakonitosti ponašanja takve jedne sumarne komponente koja u sebi sadrži nepoznate reakcije podzemlja. Naravno, ta komponenta sadrži u sebi i sustavne greške zbog loše kvantifikacije većine ostalih bilančnih parametara (isparavanja s površine jezera, pitanje pouzdanosti hidroloških podataka o protokama s mjernih postaja obzirom na uglavnom nedovoljno dobro kvantificirane konsumpcijske krivulje itd.).

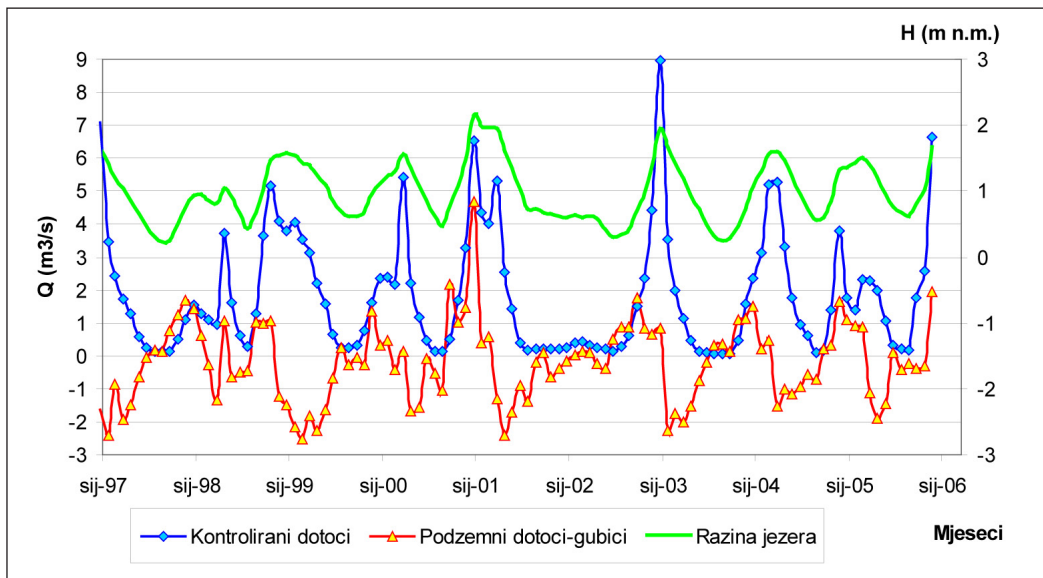
Analiza je provedena za razdoblje od siječnja 1997. godine do prosinca 2005. Ovo razdoblje izabrano je za detaljniju analizu, jer su za njega bili dostupni podaci o protocima te nije bilo potrebe za njihovim nadopunjavanjem. Bilanca je računata na način da se traženi parametar bilance mjesečne vrijednosti “Podzemnog dotoka (ili) gubitka” odredio u ovisnosti o:

- Ukupnim mjesečnim dotocima mjerenim na hidrološkim postajama na Vranskom polju,
- Dotocima kao posljedicom palih oborina na srednju mjesečnu površinu jezera,
- Isparavanjima sa srednje mjesečne površine jezera,
- Mjesečnim istjecanjima u more mjerenim na kanalu Prosika,
- Promjenom volumena vode u samom jezeru.

Rezultati proračunate prosječne bilance sumarnih podzemnih dotoka – gubitaka vode iz Vranskog jezera, kao i mjerenih prosječnih dotoka u jezero s postaja na Vranskom polju te srednjih razina vode u jezeru i moru za promatrano razdoblje, dani su u Tablici 1, dok je njihov vremenski hod dan na Slici 15.

Tablica 1. Prosječne vrijednosti osnovnih ulaznih elemenata i rezultata proračuna mjesečne bilančne analize (1997.-2005.)

	Mjereni dotoci sa sliva (m ³ /s)	Otjecanje Prosikom (m ³ /s)	Jezero (m n.m.)	More (m n.m.)	Proračunati sumarni dotoci (ili) gubici
1	3,84	2,00	1,29	0,35	0,76
2	2,66	2,35	1,37	0,29	-0,22
3	2,58	2,2	1,35	0,28	-0,07
4	2,84	1,95	1,31	0,35	-0,68
5	2,00	1,58	1,22	0,35	-0,64
6	1,06	0,92	1,04	0,33	-0,039
7	0,43	0,36	0,82	0,34	0,43
8	0,24	0,1	0,61	0,35	0,63
9	0,33	0,04	0,51	0,38	0,89
10	0,93	0,08	0,58	0,41	1,57
11	1,68	0,25	0,73	0,44	1,54
12	2,97	0,79	1,00	0,39	2,03
God.	1,8	1,05	0,99	0,35	0,49

**Slika 15.** Mjesečni hod kontroliranih dotoka i nekontroliranih dotoka (ili) gubitaka iz Vranskog jezera (1997.-2005.) [8]

Iz danih je prikaza vidljivo da se na temelju provedenih bilančnih proračuna tijekom godišnjeg hidrološkog ciklusa javljaju i povećani dotoci u jezerski sustav koji se mogu pripisati nekontroliranim podzemnim dotocima, a dijelom godine i povećani gubici. Za napomenuti je da iskazani gubici ne isključuju mogućnost istovremenog postojanja podzemnih dotoka na nekoj drugoj lokaciji u jezeru – radi se samo o sumarnom iskazu prevladavajuće bilančne komponente toga mjeseca. Tijekom analiziranog razdoblja, na razini prosječnih mjesečnih vrijednosti, iskazani gubici podzemnim putem kretali su se u rasponu do oko 2,5 m³/s, a hidrološki nekontrolirani dotoci i do 4-5 m³/s. Tu su sadržani podzemni nekontrolirani dotoci, ali i iznimne pojave površinskih otjecanja na dijelovima sliva koji su nepokriveni hidrološkim postajama.

6. Zaključak

U ovome radu provedene su brojne analize, te se u nastavku iznose najvažniji zaključci pojedinih analiza.

Statistička analiza oborina na meteorološkim stanicama Biograd i Stankovici pokazala je prisutan trend opadanja oborina, koji je nešto izraženiji na stanici Biograd.

Na mjernim stanicama Pakošanski most, Prosika jezero i Prosika napravljena je statistička analiza vodostaja koja je pokazala da je na sve tri stanice prisutan trend porasta vodostaja. Zapažena je i zabrinjavajuća situacija poklapanja ljetnih minimalnih vodostaja jezera s maksimalnim morskim razinama, koja omogućuje izravan utok mora u jezero. Autokorelacijska analiza pokazala je da jezero nema većih vodnih rezervi u podzemlju.

Analiza recesijskih krivulja pokazala je da se recesijska razdoblja javljaju najčešće između stotog i dvjestotog dana u godini i u prosjeku traju tri mjeseca. Uočeno je da se većina recesijskih krivulja može podijeliti u dva razdoblja ovisno o nagibu krivulje (brzini pražnjenja). Pritom je uočena anomalija ponašanja recesijskih krivulja. Pri nižim vrijednostima protoka jezero se brže prazni, tj. javljaju veći koeficijenti pražnjenja. Navedeno može biti posljedica povećanja evapotranspiracije i evaporacije, budući da se spomenute situacije javljaju u ljetnim mjesecima, kao i uslijed promjene konsumpcijskih uvjeta istjecanja (sniženje razina) kanalom Prosika. Za iste vrijednosti provedena je višestruka regresijska analiza koja je pokazala da na veličinu koeficijenta pražnjenja najveći utjecaj ima vodostaj na početku recesijskog razdoblja.

Bilančna analiza pokazala je da nekontrolirani dotoci i gubici vode iz jezera čine značajan dio njegove hidrološke bilance.

Na početku rada spominjana je hidrološka stabilizacija Vranskog jezera podizanjem njegova praga istjecanja. Na temelju analiza provedenih u ovome radu smatra se da je podizanje praga istjecanja Vranskog jezera bilo ne samo poželjno nego i nužno. Time se izravno spriječilo neposredno utjecanje mora u jezero za vrijeme minimalnih vodostaja kroz kanal Prosika. Podizanje razine jezera trebalo bi djelovati pogodno i na usporavanje pražnjenja jezera, jer je recesijskim krivuljama pokazano da su niži vodostaji povezani s bržim pražnjenjem jezera. Viši vodostaji utječu i na kretanje razlike volumena ukupnih dotoka i gubitaka. Stoga se očekuje da bi se trebali smanjiti izlazi iz jezera kroz kanal Prosiku, te bi samim time u jezeru trebala ostati veća količina vode. Najvjerojatnije će i dalje dolaziti do podzemne komunikacije jezero-more. Navedena komunikacija predstavlja prirodan proces, te ga kao takvog nije moguće zaustaviti već ga je jedino moguće malo ublažiti.

7. Literatura

- [1] www.vransko-jezero.com, *Park prirode Vransko jezero: O parku* (25.07.2009.)
- [2] A. Šuljić, *Vransko jezero (Biograd na Moru)*, Diplomski rad, Građevinski fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka 2009.
- [3] J. Rubinić, A. Katalinić, M. Švonja, I. Gabrić, G. Bušelić, M. Čuže, *Salinisation of Vrana Lake in Dalmatia Within the Context of Anthropogenic Influences and Climate Changes (Situation in 2008)*, *Održivost krškog okoliša – dinarski krš i ostale krške regije*, Međunarodna interdisciplinarna znanstvena konferencija, Plitvička jezera, 23.09.– 26.09.2009.
- [4] www.villadana-pakostane.com (18.09.2009.)
- [5] R. Vidaković Šutić, T. Lubura Matković, *Hidrološka obrada malih voda Ravnih Kotara i Vranskog jezera s priobalnim područjem*, VGO Split, Hrvatske vode, Zagreb 2007.
- [6] F. Fritz, *Postanak i starost Vranskog jezera kod Biograda na moru*, *Geološki vjesnik*, Zagreb, 1984.
- [7] J. Rubinić, M. Čuže, *Problem zaslanjenja sustava Vranskog jezera u Dalmaciji – stanje 2008. godine i ocijena mogućnosti osiguranja inicijalnog rješenja zaštite*, izvještaj, Park prirode Vransko jezero, Biograd na moru, 2009.
- [8] Građevinski fakultet Rijeka, *Hidrološka istraživanja na području P.P. Vransko jezero u kontekstu procjene mogućnosti zaštite jezera od zaslanjivanja*, (nositelj zadatka J. Rubinić), Rijeka, 2009. nepublicirano.

- [9] R. Žugaj, *Hidrologija*, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2000.
- [10] B. Ivanović, *Teorijska statistika*, Naučna knjiga, Beograd, 1979.
- [11] J. Rubinić, *Značajke malih voda i njihovo korištenje u krškim područjima*, Seminar male i velike vode – zbornik radova, Hrvatsko hidrološko društvo, Zagreb, 2004.
- [12] J. Rubinić, *Hidrosustavi u kršu*, priručnik za nastavu, Građevinski fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2008. (<http://www.gradri.uniri.hr/?rijeka=class1,243>)

Modelska analiza navodnjavanja kišnicom na jadranskim otocima

Model analysis of rainwater irrigation on Adriatic islands

Helena Wöflf, Goran Volf, Josip Rubinić

Sažetak. U okviru ovog rada provedeno je razmatranje oborinskih voda kao potencijalnog, a u praksi zanemarenog resursa vodnih zaliha za navodnjavanje, posebno u krškom priobalju. Uz opća sagledavanja značajki prostorno-vremenske raspodjele oborina u priobalju, provedena su i modelska sagledavanja koja predviđaju definiranje parametara modela te izradu simulacijskog matematičkog modela za određivanje stanja zaliha u vodospremištu, te modeliranje dotoka i otjecanja iz vodospremišta, kao i stupnja osiguranja potreba za vodom za različite varijante opskrbnih potreba. Variranjem potreba za vodom stanovništva i poljoprivrednih površina te veličine vodospreme i nakapne plohe dobivaju se različiti postotci zadovoljenja potreba s jedne strane, dok s druge strane model služi i za sagledavanje stanja zaliha u vodospremi u određenom mjesecu na određenoj lokaciji (Hvar, Cres, Brač, Lošinj, Rab te Dugi otok).

Ključne riječi: modelska analiza, navodnjavanje, kišnica, jadranski otoci

Abstract. Rainwater as a potential, but in practice neglected resource of water for irrigation, especially in karst coastal areas, has been considered in this paper. With the general perception of spatial-temporal distribution features of rainfall in the coastal areas the model perception is also provided that provides the definition of the model parameters and construction of the simulation-mathematical model for determining the water supplies in the water reservoir, the modelling of discharges and runoff from the water reservoir, and the degree of needs to provide water for different variations of the water supply needs. Varying the water demand by population and agricultural areas with the size of water tanks and rainwater surfaces we receive different percentages for satisfying need for the water on one

hand while on the other hand a model serves for the analysis of water supplies in reservoirs in a given month at a specific location (Hvar, Cres, Brač, Lošinj, Rab and Dugi otok).

Key words: model analysis, irrigation, rainwater, Adriatic islands

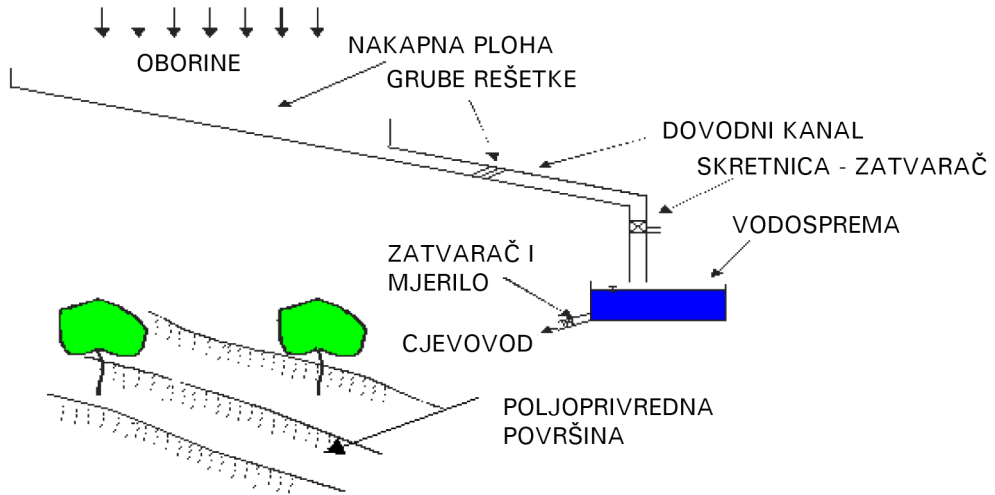
1. Uvod

Tradicionalni oblik osiguravanja vode za potrebe navodnjavanja je korištenje kišnice. Količina kiše koja padne na području otoka tijekom godine je relativno velika i dostatna za navodnjavanje tijekom sušnih ljetnih mjeseci. Međutim, korištenje kišnice zahtjeva izgradnju nakapne plohe i akumulacije-vodospremišta-gustirne. Ovo je dobro i relativno jeftino rješenje, ali uglavnom individualnog karaktera korištenja. To znači da se ovo rješenje koristi uglavnom za manje lokalne potrebe, a ne kao regionalno rješenje većeg kapaciteta čemu je razlog za to oduvijek bila skupa izgradnja. Međutim, danas je izgradnja znatno jeftinija i jednostavnija zbog mogućnosti korištenja raznih materijala i tehnika izvedbe, te se akumulacije-gustirne mogu brzo i jeftino graditi ili ugrađivati. Zbog toga je ovaj oblik osiguranja vode za potrebe navodnjavanja pristupačan te ga stoga treba razmatrati kao ozbiljnu alternativu, odnosno dopunu konvencionalnim rješenjima.

Osnovni elementi sustava opskrbe vodom kišnicom prikazani su na slici 1. Za razliku od tradicionalnih "kućnih cisterni" kod ovog sustava nakapna ploha je prirodna ili umjetno stvorena površina, dok cisternu zamjenjuje akumulacija/rezervoar. Dva su osnovna dijela ovog sustava: nakapna ploha/površina za sakupljanje vode i vodospremište/akumulacija za spremanje vode. Sustav se oprema svim potrebnim elementima u skladu s karakteristikama lokacije, od kojih su najvažniji: (i) elementi za prikupljanje vode te (ii) elementi za održavanje sustava.

Tehnološki proces sustava je jednostavan. Kiša pada na nakapnu plohu; pala kiša se sakuplja kanalima i odvodi kanalima ili cijevima u gustrinu. Prije nego dođe do vodospremišta kišnica se pročišćava na gruboj rešetci. Sakupljena voda u vodospremištu se zadržava i koristi u skladu s potrebama. Voda za korištenje iz vodospremišta se uzima direktno nategom ili indirektno odvodnim cjevovodom. Sustav treba koncipirati tako da voda kroz sustav teče gravitacijski. Na ovaj način se izbjegavaju troškovi potrošnje energije koji su u slučaju izoliranih lokacija vrlo veliki [1].

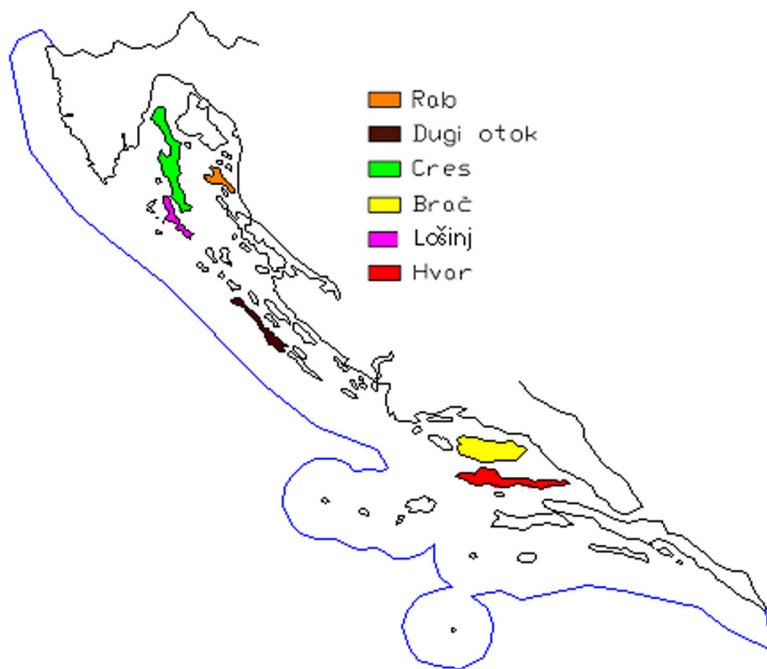
Osnovni elementi sustava opskrbe vodom kišnicom prikazani su na slici 1.



Slika 1. Osnovni koncept sustava opskrbe vodom poljoprivrednika [1]

Da bi se zadovoljile potrebe za vodom za navodnjavanje (traženog stupnja zadovoljenja izraženog u %), uz poznavanje značajki oborinskog režima nužno je provesti bilančna razmatranja koja se provode modelskim preispitivanjima. Pri tome je moguće varirati ili veličinu nakapne plohe, ili volumen vodospremišta. U predmetnom je radu, temeljenom na radu [2] naglasak dan upravo na takvoj jednoj modelskoj simulacijskoj analizi rada sustava za navodnjavanje koji se sastoji od nakapne plohe i vodospremišta, a za koju je svrhu napravljen i poseban jednostavan simulacijski model, razvijen u tabličnom kalkulatoru MS EXEL-u, i kao takav pristupačan velikom broju potencijalnih korisnika. Prilikom proračuna potreba vode za navodnjavanje korišten je već raspoloživi model CROPWAT [3], razvijen od strane FAO-stručnjaka UN-a (Food and Agriculture Organization of the United Nations).

Kako bi se osigurala usporedba dobivenih rezultata, pri provedenim analizama razmatrani su otoci duž čitave obale Jadranskog mora – Rab, Dugi otok, Cres, Brač, Lošinj i Hvar (Slika 2).



Slika 2. Jadranski otoci za koje su analizirane potrebe za navodnjavanjem

2. Proračun potrebne količine vode za navodnjavanje

Potrebne količine vode za navodnjavanje ovise o vrsti kulture u nasadu, kao i klimatološkim značajkama lokacije na kojoj se planira navodnjavanje. U tom se kontekstu pri analizama najviše koriste podaci s evapotranspiracijom ET_0 i oborinama P .

Naime, za proračun potreba vode odabranim modelom [2], treba između ostalog, raspolagati sa rezultatima o evapotranspiraciji – ET_0 (izraženoj u mm/dan) te oborinama – P (mm).

U ovom radu zbog nedostatka podataka za izračun ET_0 korišteni su za analizirane otoke najbliže meteorološke postaje na obali sa danom ET u mm/mjesec (Tablica 1.).

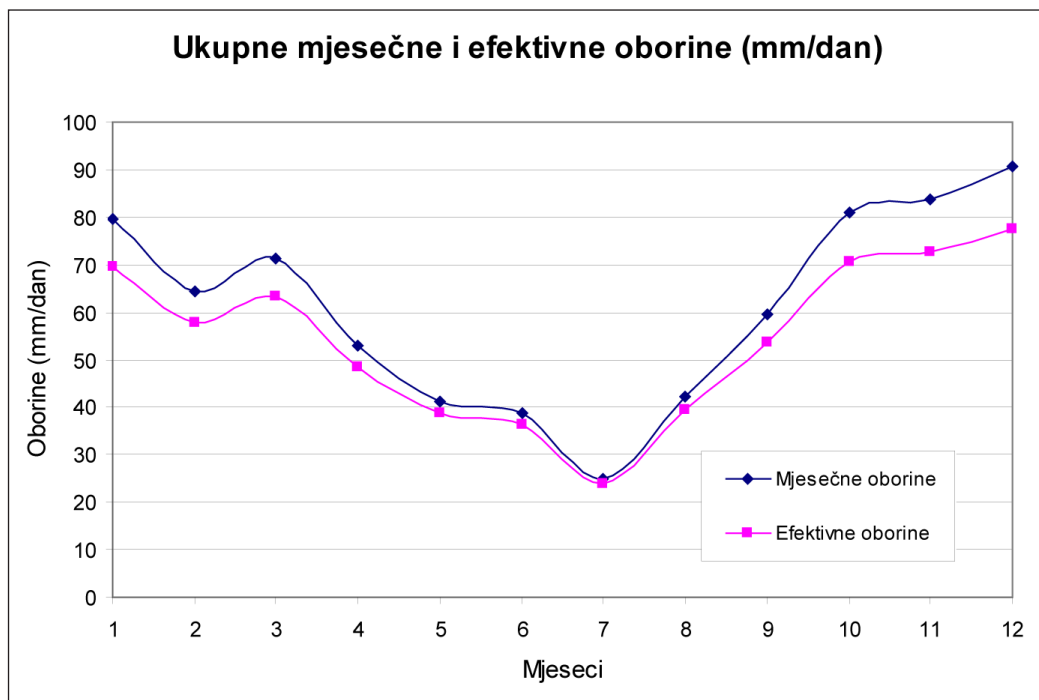
Tablica 1. *Evapotranspiracija (mm/mjesec) za pojedine otoke [4]*

Mjeseci	Otoci (meteorološke postaje)					
	Hvar (Split)	Rab (Rijeka)	Lošinj (Pula)	Brač (Split)	Cres (Rijeka)	Dugi Otok (Zadar)
1	14,0	11,7	11,7	14,0	11,7	13,6
2	15,9	13,7	13,7	15,9	13,7	14,6
3	29,8	27,6	26,9	29,8	27,6	27,5
4	50,1	49,3	47,7	50,1	49,3	45,2
5	94,6	87,8	85,9	94,6	87,8	87,0
6	130,6	117,1	120,1	130,6	117,1	114,8
7	159,9	141,3	144,4	159,9	141,3	141,5
8	142,9	125,6	126,0	142,9	125,6	123,4
9	99,9	86,5	85,6	99,9	86,5	86,3
10	59,7	53,6	53,9	59,7	53,6	53,6
11	30,3	29,2	26,6	30,3	29,2	26,2
12	17,1	17,3	15,5	17,1	17,3	13,9

Od ukupne količine vode koja padne na površinu zemlje nije sve raspoloživo bilju: dio ispari, dio otječe, a dio ponire u tlo. Količina vode koja ponire jedino je raspoloživa za kulturno bilje, i ne uvijek sva. Naime, što je količina oborine veća, to je postotak efektivnosti manji, odnosno količina efektivnih oborina može biti najviše jednaka kapacitetu tla za vodu; sav je višak “neefektivan”. U tablici 2. i na slici 3 prikazani su, kao primjer, rezultati proračuna efektivnih oborina za otok Hvar.

Tablica 2. *Efektivne oborine i prosječne mjesečne oborine za otok Hvar – Grad Hvar*

Mjesec	Oborine (mm/mjesec)	Ef. oborine (mm/mjesec)
Siječanj	79,5	69,4
Veljača	64,4	57,8
Ožujak	71,3	63,2
Travanj	52,9	48,4
Svibanj	41,3	38,6
Lipanj	38,7	36,3
Srpanj	24,8	23,8
Kolovoz	42,3	39,4
Rujan	59,4	53,8
Listopad	81,1	70,6
Studeni	83,9	72,6
Prosinac	90,8	77,6
Ukupno (mm/god.)	730,4	651,5



Slika 3. Vrijednosti efektivnih i prosječnih mjesečnih oborina za otok Hvar – Grad Hvar

Ulazni podaci o uzgojenom bilju, koji su nužni za proračun potreba za vodom su koeficijent kulture – K_c , dubina zakorijenjavanja, sniženje vlage – p , te faktor prinosa – K_y . Ukupno trajanje vegetacije svakog usjeva se obično dijeli u četiri karakteristične razvojne faze i to: početna, razvojna, središnja i kasna [5].

Početna faza: nicanje i rani rast dok je površina tla još gola, pa sve do pokrivanja od 10%.

Razvojna faza: nastavljanje na početnu fazu, pa sve do efektivnog punog pokrova tla (70-80%).

Središnja faza: od punog pokrivača tla do početka sazrijevanja.

Kasna faza: od kraja središnje faze pa sve do završetka sazrijevanja, odnosno berbe.

Dužina vegetacijske sezone uglavnom ovisi o vrsti usjeva i uvjetima uzgoja, posebno temperature. Koeficijenti kultura (K_c) se na eksperimentalnim postajama određuju tako što se istodobno mjeri ET referentnog i razmatranog usjeva. Nakon toga određuje se koeficijent u obliku bezdimenzionalnog broja kao kvocijent tih dvaju mjerenja. Dubina zakorijenjavanja u najvećoj mjeri ovisi o vrsti uzgajane kulture te fazi razvoja, ali i o sastavu i dubini tla, te o eventualnoj pojavi

nepropusnih slojeva. Dubina vlaženja najčešće se bira kao polovina najveće dubine zakorjenjivanja. Dopustivo sniženje vlage u tlu predstavlja donju granicu količine vode u tlu nakon čega nastaju štete na usjevima uslijed suše. Vrijednosti se izražavaju kao kvocijent ukupno raspoložive vode u tlu. Faktor prinosa (K_y) predstavlja postotak smanjenja prinosa uslijed stresa izazvanog nedostatkom vlage. Taj se faktor daje za svaku razvojnu fazu.

Datum sjetve/sadnje predstavlja važan ulazni podatak. Najčešće se određuje na temelju klimatskih uvjeta i lokalnih prilika. Određivanje tog datuma važno je za izradu rasporeda natapanja i utvrđivanja datuma žetve.

U ovom radu korištene su, kao tipične otočke kulture, vinova loza, rajčica, nisko povrće, agrumi, te masline.

Na temelju spomenutih ulaznih podataka, CROPWAT-om su proračunate potrebe vode za navodnjavanje pojedinih otočkih kultura (Tablica 3).

Tablica 3. Zahtjevi za navodnjavanje pojedinih kultura u l/s/ha na gore prikazanim otocima (proračunato u Cropwatu)

kultura mjesec	vinova loza [l/s/ha]	agrumi [l/s/ha]	maslina [l/s/ha]	rajčica [l/s/ha]	nisko povrće [l/s/ha]
1		0			
2		0			
3		0	0		
4	0	0	0		
5	0	0,01	0,1	0,05	0,08
6	0,1	0,13	0,24	0,41	0,41
7	0,19	0,15	0,27	0,72	0,49
8	0,07	0,05	0,16	0,57	0,39
9	0	0	0	0,17	
10	0	0	0		
11		0	0		
12		0			

U modelu je, kao pretpostavka za postojanje autonomnog otočkog izvorišta vodoopskrbe, uz zadovoljavanje potreba za navodnjavanje, analizirano i korištenje vode iz vodospremišta i za vodoopskrbu lokalnog stanovništva. Pri tome je odabrana vodoopskrbna norma za stanovništvo od 200 l/stanovniku/dan tj. 0.2 m³/stan./dan [6].

3. Metodološke postavke modelske analize veličine nakapne plohe vodospremišta za zadovoljavanje potreba za navodnjavanje

Osnovna pitanja na koje treba odgovoriti modelskom analizom su:

- uz zadanu veličinu nakapne plohe, koliko treba biti veliko vodospremište (kapacitet) V_{vod} da bi se zadovoljile potrebe unutar prihvatljivog postotka zadovoljenja p (usvojen u rasponu 80 do 100%) ?
- uz zadanu veličinu vodospremišta, kolika treba biti površina nakapne plohe da bi se zadovoljile potrebe unutar prihvatljivog postotka zadovoljenja p ?

Za osiguranje odgovora na ova pitanja, napravljen je simulacijski matematički model, izrađen u tabličnom kalkulatoru MS EXCEL. Slijedi prikaz funkcioniranja tog modela.

Stanje volumena u vodospremištu se najjednostavnije opisuje osnovnom bilansnom jednažbom (1):

$$X - Y = \Delta V \quad \text{u periodu } \Delta t \quad (1)$$

gdje je:

- X – svi ulazi u periodu Δt ,
- Y – svi izlazi u periodu Δt ,
- V – volumen,
- ΔV – volumenska promjena za Δt ,
- Δt – vremenski korak u ovom modelu to je mjesec dana.

Osnovni preduvjet korištenja ove jednažbe koja počiva na očuvanju bilance masa, je pretpostavka da je istjecanje iz vodospremišta isključivo rezultat promjene veličine volumena (razine) vode u vodospremištu.

Osnovu simulacijskog modela čini bilančna jednažba volumena vodospremišta (2). Trenutno stanje u vodospremištu je volumen vode na kraju svakog mjeseca i računa se na slijedeći način:

$$V_{i+1} = V_i + \sum_{j=1}^{m_i} X_{i,j} - \sum_{j=1}^{m_o} Y_{i,j} = V_i + \Delta V_i \quad (2)$$

gdje je:

- V_i – prethodno stanje.

Prvo početno stanje je zapravo puno vodospremište. Obzirom da je maksimalna visina vode u vodospremištu ulazna vrijednost u modelu tada se iz zadane vrijednosti volumena vodospremišta dobije sljedeća jednažba (3):

$$A_{\text{vod}} - \text{površina dna vodospreme: } A_{\text{vod}} = V_i / h_{\text{max}} \quad (3)$$

(pri svim, u ovom radu provedenim analizama odabrano je $h_{\text{max}} = 4$ m kao prihvatljiva veličina za izgradnju jednostavnog vodospremišta)

$X_{i,j}$ – svi ulazi $j=1, \dots, m_i$ u vremenskom intervalu Δt_i ,

$Y_{i,j}$ – svi izlazi $j=1, \dots, m_0$ u vremenskom intervalu Δt_i ,

ΔV – razlika dotoka i potrošnje za interval.

U jednadžbu “(2)” se unose:

- srednje vrijednosti odabranog vremenskog intervala (usvojena mjesečna razina diskretizacije),
- početno stanje,
- stvarne rubne uvijete $h_{\text{max}} = (4)$ m, $h_{\text{min}} = 0$ m, te dobivamo:

$$V_{i+1} = V_i + \sum_{j=1}^{m_i} X_{i,j} \Delta V_i - Q_{n_i} - Q_{v_i} \quad (4)$$

gdje je:

- početno stanje, pretpostavlja se dok se u modelu ne dobije odgovarajući postotak zadovoljenja potreba,
- svi ulazi u vremenskom intervalu Δt_i ; (kontrolirani i nekontrolirani),
- Q_{n_i} – voda za navodnjavanje u vremenskom intervalu Δt_i ; (potrošnja),
- Q_{v_i} – količina vode za vodoopskrbu,
- i – računski korak je mjesec dana.

Proračun se radi tako da se za početni period pretpostavlja kraj kišne godine kada je vodospremište puno.

Na temelju istog određuje se maksimalno dozvoljeno punjenje kod kojeg nastupa prelijevanje vode iz vodospremišta V_{max} .

Prelievanje se računa na slijedeći način:

Ako je: $V_{i+1} > V_{\text{max}}$; tada je $V_{\text{preljeva}} = V_{i+1} - V_{\text{max}}$, a V_{i+1} postaje V_{max} ,

Ako je: $V_{i+1} \leq V_{\text{max}}$; tada je $V_{\text{preljeva}} = 0$.

U slučaju da je stanje volumena nula ili negativno korigira se istjecanje:

Ako je: $V_{i+1} \leq 0$; tada je $V_{i+1} = 0$, a $Q_{n_i} = 0$

Dotoci su u skladu s obradom raspoloživog niza ulaznih podataka na određenom otoku.

S ovako odabranim veličinama ulaznih podatka simulira se stanje u akumulaciji za jednu hidrološku godinu tako da je vremenski korak mjesec.

Proračun se radi iterativno. Temeljem prve iteracije analiziraju se rezultati i popravljaju parametri proračuna. Korigira se veličina nakapne plohe i volumen vodospremišta, te visina vode u vodospremištu koja je u prvom koraku procijenjena, da bi se kroz nekoliko iteracija došlo do odgovarajućih vrijednosti tih veličina.

Isto tako, analiziraju se i veličine prelijevanja. Ako se javlja prelijevanje, tada je dotok veći od potreba te se voda nepotrebno gubi.

Npr. u periodu od 1961.-1990. za fiktivno vodospremište na Hvaru volumena $V = 5500 \text{ m}^3$ s nakapnom plohom površine $A = 10\,000 \text{ m}^2$ (dim. $100 \times 100 \text{ m}$) koja zadovoljava potrošnju za 10 stanovnika i 1 ha vinove loze iz vodospremišta se prelije tj. izgubi otprilike $36\,500 \text{ m}^3$ vode.

Račun se ponavlja s novim veličinama volumena vodospremišta i dotoka, potrošnje obzirom da su na svakom otoku različiti ulazni podatci o oborinama, evapotranspiracijama, odnosno proračunatim potrebama navodnjavanja. Račun se ponavlja dok se ne dobiju zadovoljavajući rezultati.

Ulazni parametri modela su:

- početna visina vode u vodospremištu h_0 [m],
- površina nakapne plohe A_{np} [m²],
- volumen vodospremišta V_{vod} [m³],
- max. visina vode u vodospremištu h_{max} [m],
- prosječne mjesečne oborine O [mm] – potrebne opskrbe stanovništva,
- broj stanovnika – navodnjavana površina (u ha),
- potrebe za vodom za navodnjavanje,
- korekcijski faktori ϕ otjecanja/gubitaka za betonsku nakapnu plohu sa spojnica.
- volumen vodospremišta V_{vod} [m³],
- površina nakapne plohe A_{np} [m²],
- visina vode u vodospremištu h_1 [m].

Izlazni parametri:

- podatak o zadovoljavanju potreba za vodom po pojedinim godinama – “zadovoljava” ili “nezadovoljava”,

- postotak zadovoljenja p u analiziranom nizu godina [%],
- stanje dotoka X_i i potrošnje Y_i te njihove razlike ΔV [m^3],
- visinu vode u vodospremi na kraju pojedinog mjeseca h_i [m]:

$$h_i = h_{i-1} + \frac{X - Y}{A_{\text{vod}}} \quad (5)$$

gdje je:

- h_i – visinu vode u vodospremi na kraju pojedinog mjeseca [m],
- h_{i-1} – visinu vode u vodospremi na kraju prethodnog mjeseca [m],
- X – dotoci od oborina [m^3],
- Y – potrošnja [m^3],
- A_{vod} – površina dna vodospremišta [m^2],
- $V_{\text{vod.mjes.}}$ – volumen vode u vodospremištu na kraju svakog mjeseca [m^3].

Postupak proračuna volumena vodospremišta te površine nakapne plohe uz dani postotak zadovoljenja potreba za vodom danim se modelom provodi na slijedeći način:

Kao ulazne parametre, kako je već prije navedeno, prije samog proračuna moramo upisati vrijednosti o:

- a) početnoj visini vode u vodospremištu $h_{\text{poč}} = h_{\text{max}}$ [m],
- b) vrijednosti o potrošnji za vodoopskrbu te vrijednosti o potrošnji vode za navodnjavanje poljoprivrednih kultura [m^3 /mjesec].

Parametri koje pretpostavljamo tj. tražimo iterativno i koji ovise o zadovoljenju potreba za vodom su:

- a) površina nakapne plohe A_{np} [m^2], te
- b) volumen vodospremišta V_{vod} [m^3].

Kao rezultat dobivamo zadovoljenje potreba za vodom:

$$p = \frac{N - Z}{N} \times 100 \quad [\%], \quad (6)$$

gdje je:

- p – postotak zadovoljenja potreba (%),
- N – ukupan broj analiziranih godina,
- Z – broj godina kod kojih se ne zadovoljavaju potrebe za vodom pri zadanoj geometriji – površini nakapne plohe i volumena vodospremišta.

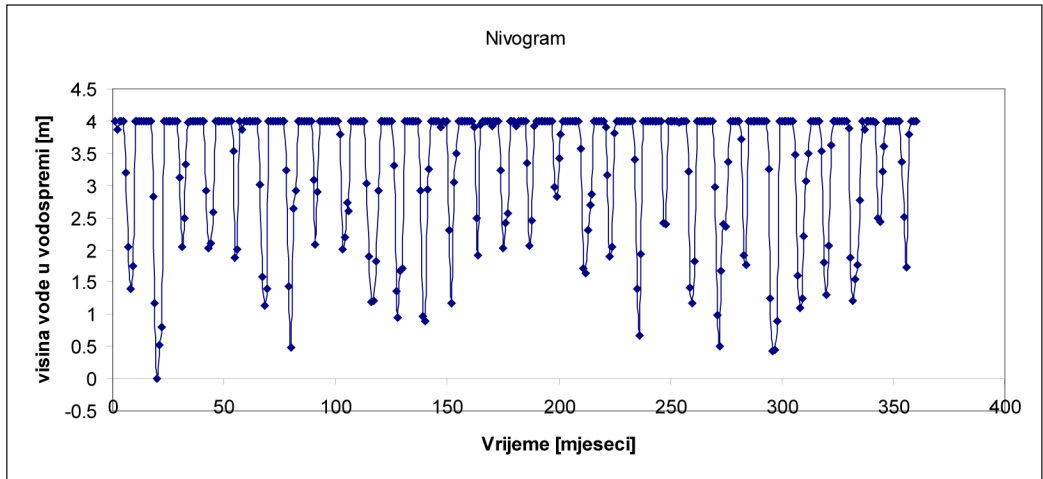
Stupanj zadovoljenja potreba za vodom određen je prema frekvenciji od jedne godine – ukoliko u nizu od 12 kalendarskih mjeseci jedan mjesec u godini ne zadovoljava tada se uzima da ni cijela godina ne zadovoljava.

4. Rezultati provedene modelske analize

Modelska analiza provedena je uz slijedeće pretpostavke:

- Usvojeno je referentno 30-godišnje oborinsko razdoblje 1961.-90. za koje su korišteni registrirani podaci o palim oborinama na pojedinim otočkim lokalitetima.
- Broj stanovnika variran je u rasponima od po 10, 50, 100, 300 i 500 ljudi.
- Navodnjavana površina varirana je u rasponima od po 1, 5, 10, 20 te 50 ha.
- Različite kulture zasađene na pojedinim otocima (rajčica, vinova loza, nisko povrće, agrumi, maslina) da bi se vidjelo koje su potražnje potrebe za vodom za te kulture.
- Radi generalne usporedbe potreba navodnjavanja i veličina vodospremišta napravljena je i varijanta da je na svih šest otoka zasađena kombinacija rajčica-vinova loza.
- Varirane su različite veličine nakapnih ploha i volumena vodospremišta, uz odabranu maksimalnu visinu vode u vodospremištu od 4 m.

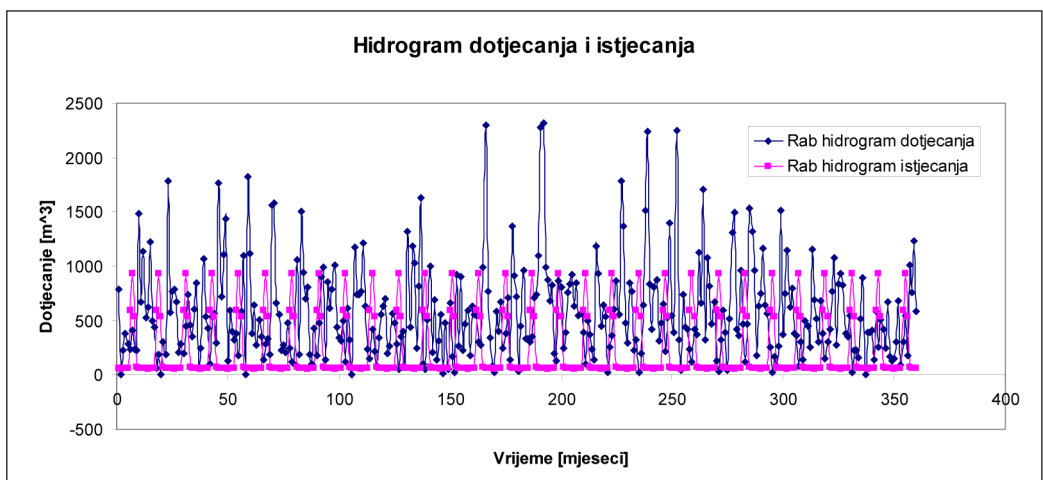
Radi ilustracije rada modela, prikazani su nivogrami stanja u vodospremištu na hipotetskim primjerima navodnjavanja pilot područja na otoku Rabu, za potrošnju od 10 stanovnika i 1 ha zasađen vinovom lozom i rajčicom (0,5 ha rajčica, 0,5 ha vinova loza). Pri tome je analiziran primjer s nakapnom plohom površine 10 000 m² i uz volumen vodospremišta od 1810 m³ uz zadovoljenje potreba za vodom od 100 % (Slika 4).



Slika 4. Nivogram stanja u vodospremištu na primjeru pilot područja na otoku Rabu (za nakapnu plohu od 10 000 m² i volumen vodospremišta od 1810 m³)

Iz slike 4 je vidljivo da je tijekom analiziranog razdoblja od 30 godina svega u jednoj godini došlo do stanja nezadovoljavanja potreba za vodom, odnosno sniženja razine vode u vodospremištu do stanja potpunog presušivanja. S druge strane, vidljivo je i da su gotovo svake godine prisutna i prelijevanja nepotrošenih viškova vode iz vodospremišta.

Također je dan (Slika 5) i prikaz hidrograma dotoka i otjecanja vode iz vodospremišta za analizirani slučaj.



Slika 5. Hidrogram dotjecanja i otjecanja iz vodospremišta na primjeru pilot područja na otoku Rabu (za nakapnu plohu od 10 000 m² i volumen vodospremišta od 1810 m³)

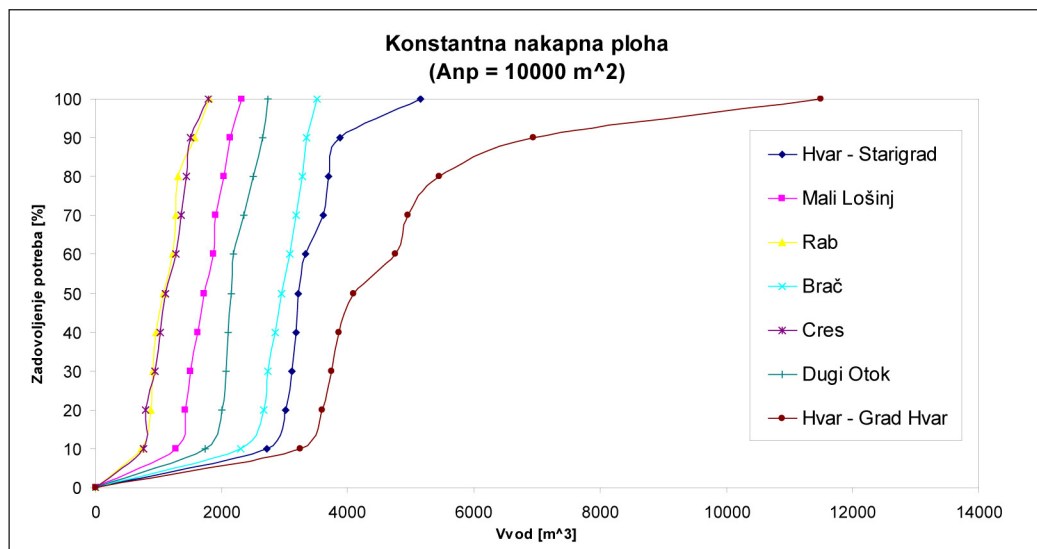
Na temelju niza provedenih modelskih analiza, varirajući pri tome velik broj ulaznih parametara, napravljene su i detaljnije usporedne analize:

- ovisnost potrebnog volumena vodospremišta o postotku zadovoljenja potreba za vodom;
- ovisnost potrebne površine nakapne plohe o postotku zadovoljenja potreba za vodom;
- generalna usporedba potrebnih volumena vodospremišta i nakapnih ploha za 100% – no zadovoljenje na odabranim otocima;
- ovisnost volumena vodospremišta i postotka zadovoljenja potreba za vodom za različite potrošnje.

4.1. Ovisnost potrebnog volumena vodospremišta o postotku zadovoljenja potreba za vodom

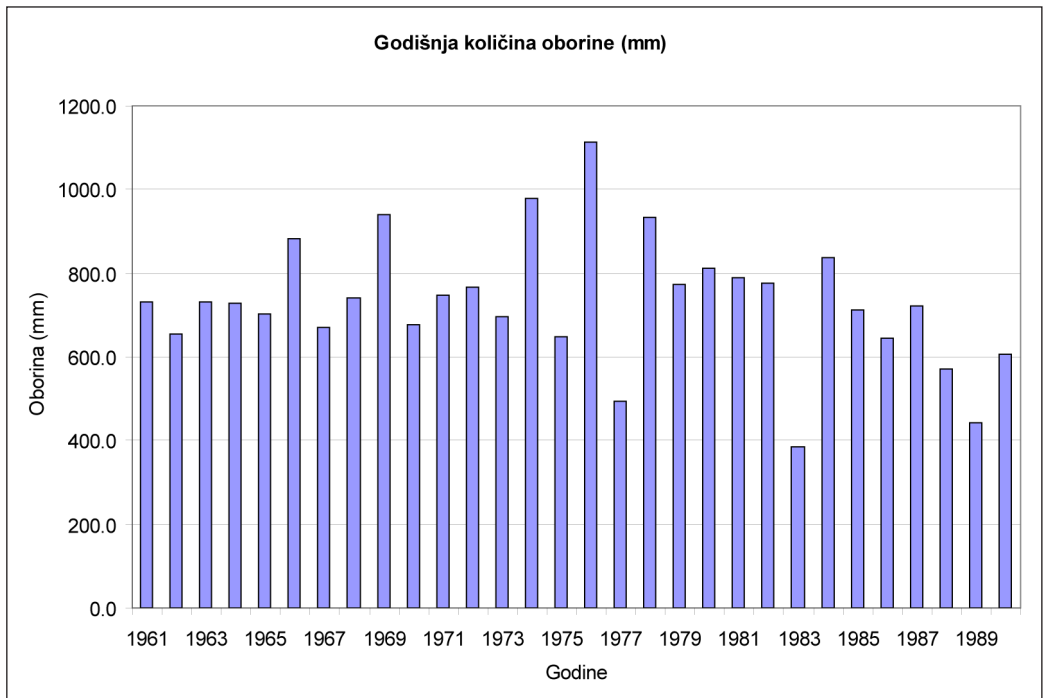
Na slici 6. prikazani su rezultati dobivenog potrebnog volumena vodospremišta uz zadane sljedeće uvjete:

- konstantnu nakapnu plohu; $A_{np} = 10\ 000\ m^2$,
- 1 ha zasađene površine; 0.5 ha rajčica i 0.5 ha vinova loza,
- 10 stanovnika.



Slika 6. Ovisnost potrebnog volumena vodospremišta o postotku zadovoljenja potreba za vodom za konstantnu nakapnu plohu $A_{np} = 10\ 000\ m^2$

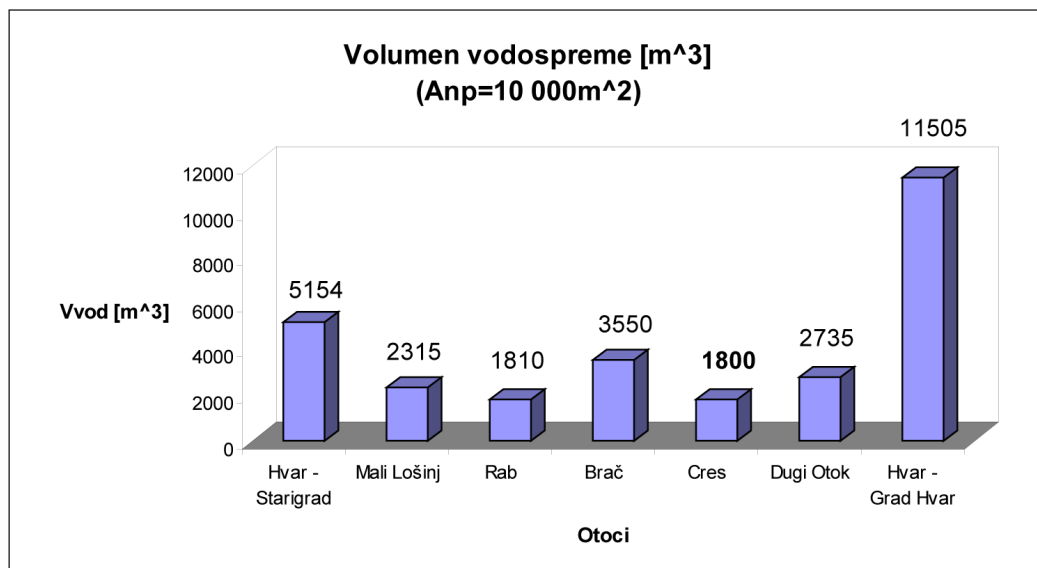
Iz slike 6 možemo vidjeti kako se potreban volumen vodospremišta povećava od sjevera prema jugu obalnog područja Republike Hrvatske. Također se može vidjeti veliko odstupanje za otok Hvar zbog izuzetno sušnijih prilika. Razlog tome su ekstremno sušne 1983. i 1989.g., kod koje je na Hvaru zabilježena daleko najmanja količina oborina u odnosu na višegodišnji prosjek (Slika 7).



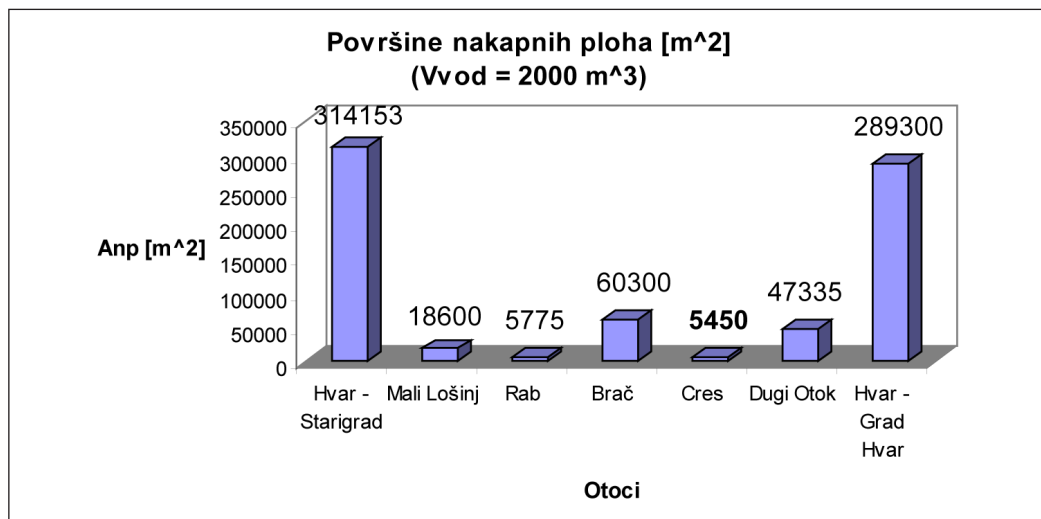
Slika 7. Godišnje količine oborina za otok Hvar – Grad Hvar

4.2. Generalna usporedba potrebnih volumena vodospremišta i nakapnih ploha za 100% – no zadovoljenje na odabranim otocima

Na grafovima u nastavku prikazana je generalna usporedba (Slika 8 i 9) veličina vodospremišta te nakapne plohe na svakom od 6 otoka koja bi bila potrebna za 100 %-tno zadovoljenje potreba za vodom 10 stanovnika i to za varijantu da je na svih šest otoka zasađena kombinacija rajčica-vinova loza na 1 ha (0,5 ha rajčica, 0,5 ha vinova loza). Iz danih prikaza može se zaključiti da je za analizirane kulture (rajčica i vinova loza) vjerojatno puno manje isplativo osigurati primjereni stupanj zadovoljenja potreba vodom za navodnjavanje na Hvaru i Braču nego li na sjevernojadranskim otocima gdje je potreban volumen vodospremišta znatno manji.



Slika 8. Generalna usporedba potrebnih volumena vodospremišta za pretpostavljenu nakapnu plohu od 1 ha tj. 10 000 m² (postotak zadovoljenja p=100%)

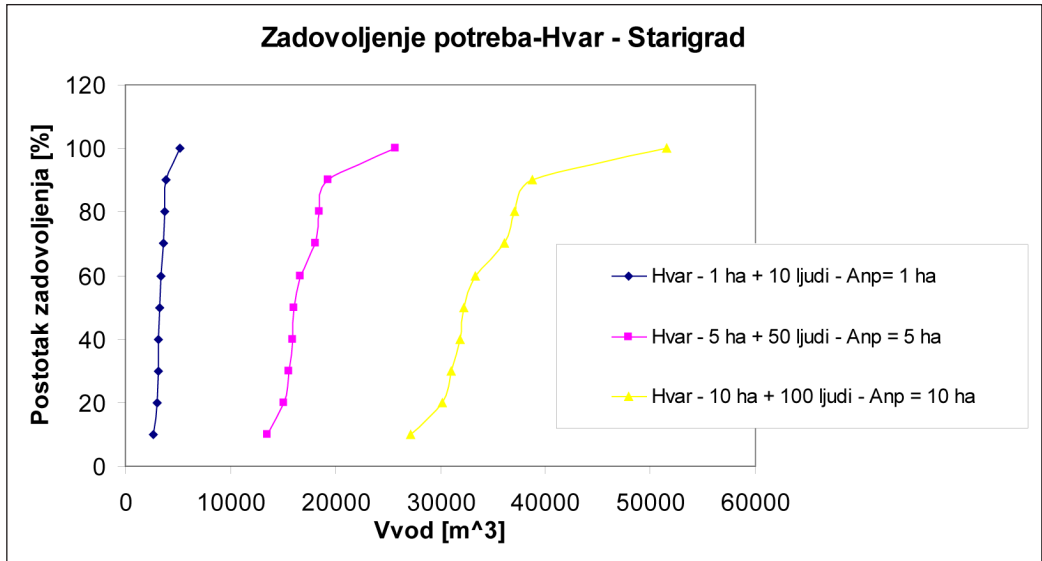


Slika 9. Generalna usporedba potrebnih površina nakapnih ploha za pretpostavljenu srednju vrijednost volumena vodospremišta od 2000 m³ (postotak zadovoljenja p=100%)

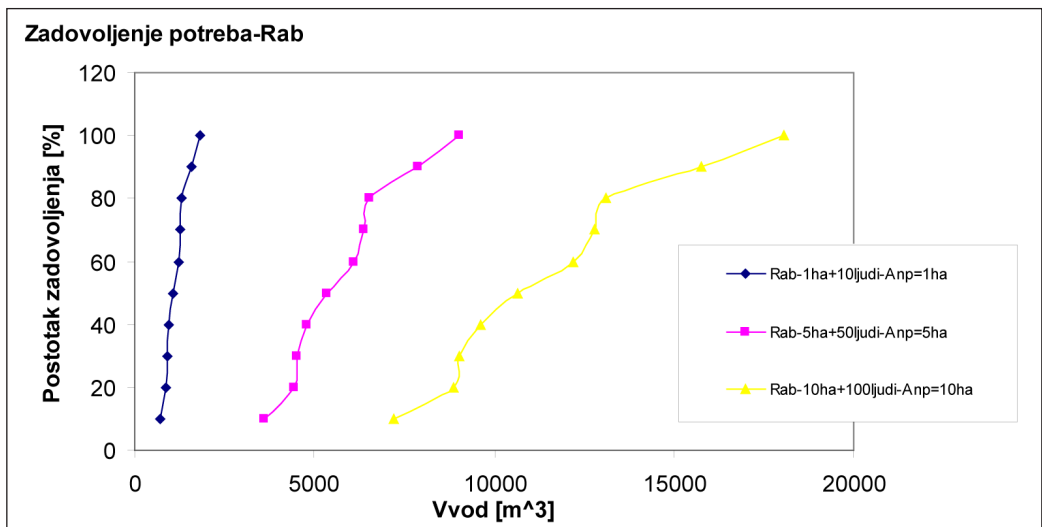
4.3. Ovisnost volumena vodospremišta i postotka zadovoljenaja potreba za vodom za različite potrošnje

Na primjeru u nastavku prikazani su (Slika 10 i 11) rezultati modela na kojima možemo vidjeti kako volumen vodospremišta raste sa potrošnjom. Odabrani su

otoci Rab, kao primjer otoka koji se nalazi na sjevernom Jadranu (veće oborine) te otok Hvar koji se nalazi južnije na kojem su zabilježene i manje oborine. Iz spomenutih slika vidimo da ako povećavamo potrošnju u vodoopskrbi te navodnjavanju za 5 i 10 puta volumen vodospremišta uz konstantnu nakapnu plohu povećava se za isto toliko za koliko smo povećali potrošnju.



Slika 10. Prikaz volumena vodospremišta uz konstantnu nakapnu plohu za različite potrošnje za otok Hvar – Starigrad



Slika 11. Prikaz volumena vodospremišta uz konstantnu nakapnu plohu za različite potrošnje za otok Rab

6. Zaključak

U radu je napravljen model koji omogućava primjerenu analizu potrebnog volumena vodospremišta, kao i površinu nakapne plohe, za procjene zadovoljavanja potreba za vodom za vodoopskrbu i navodnjavanje iz kišnice – kako na otocima gdje je provedena analiza, tako i šire.

Sustav opskrbe vodom putem kišnice je bio i bit će jedan od kvalitetnih oblika vodoopskrbe poljoprivrednih površina. Da bi takav sustav opskrbe bio pouzdan i učinkovit potrebno ga je ispravno dimenzionirati i projektirati, te dobro održavati. Prilog efikasnijem planiranju može biti i upotreba simulacijskih modela kakvi su korišteni i u ovom radu – gotovih, npr. CROPWAT za proračun potreba za vodom različitih kultura, ali i jednostavnih modela za bilanciranje veličine nakapne plohe i vodospremišta, kakav je razvijeni simulacijski model opisan u radu.

Upotrebom ovog modela u dimenzioniranju nakapne plohe i volumena vodospremišta moguće je jednostavno, brzo i efikasno odabrati i odlučiti o veličini vodospremišta te nakapne plohe koja bi trebala biti izgrađena na pojedinom lokalitetu kako ne bi dolazilo do neželjenih i nepredviđenih nestašica vode. U radu su utvrđene i velike razlike između sjevernije i južnije lociranih jadranskih otoka, kod kojih su sušne hidrološke prilike naglašenije, pa je za postizanje istog stupnja sigurnosti nužno imati puno veće površine nakapnih ploha, odnosno volumene vodospremišta.

7. Literatura

- [1] Margeta, J. *Navodnjavanje na otocima*, U: (ur. Ožanić, N.) Priručnik za hidrotehničke melioracije III. Kolo, Knjiga 3, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2007.
- [2] Wolfl, H. *Izrada modela sustava za navodnjavanje na jadranskim otocima (oborine-nakapna ploha-vodosprema)*, završni rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2008.
- [3] FAO; CropWat (A computer program for irrigation, planning and management), Version 4.3 “CropWat 4 Windows”, Roma, 1998. (http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html – pristupljeno svibanj 2010.)
- [4] Tomić F., Vidavček Ž. i Romić D. *Potrebe vode za navodnjavanje*, U: (ur. Ožanić, N.) Priručnik za hidrotehničke melioracije II. Kolo, knjiga 2, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 1993.
- [5] Kos Z. i Vlah S. *CROPWAT, Računalni program za određivanje potrebe vode za natapanje*, Građevinski godišnjak, HDGI, Zagreb, 1997.
- [6] Žic E. *Vodoopskrba*, interna skripta. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2003.

Baricentrička forma Lagrangeove interpolacije

Barycentric Lagrange Interpolation

Ines Radošević, Vedran Jagodnik

Sažetak. Polinomna interpolacija je najčešće spominjana interpolacijska metoda, što proizlazi iz njene jednostavnosti i primjene kod numeričkog deriviranja i integriranja. Zbog svojih nedostataka rijetko se koristi u praksi za aproksimaciju funkcija i rekonstrukciju iz konačnog skupa podataka. Lagrangeova forma interpolacijskog polinoma može se zapisati preko baricentričke formule čime dobiva poboljšana svojstva i postaje najbolji odabir među polinomnim interpolacijama. Točnost spomenute interpolacije značajno ovisi o odabiru čvorova i njihovom indeksiranju, pa usprkos jednostavnosti ekvidistantne mreže koja u sredini intervala ima dobra svojstva, ali ne i na rubovima, konstruira se Čebiševljeva mreža koja popravlja konvergenciju na rubovima intervala. Uz teorijski prikaz dani su i numerički primjeri korištenjem programskog paketa MATLAB.

Ključne riječi: polinomna interpolacija, Lagrangeova interpolacija, baricentrička formula, ekvidistantna mreža, Čebiševljeva mreža

Abstract. Polynomial interpolation is the most commonly mentioned interpolation method, which stems from its simplicity and application to numerical differentiation and integration. Because of its shortcomings, however, it is rarely used in practice for approximation of functions and reconstruction from a finite data set. The Lagrange interpolation polynomial can be written in a barycentric form which results in improved performance and makes the Lagrange interpolation polynomial the best choice for polynomial interpolation. The accuracy of polynomial interpolation significantly depends on the selection of nodes and their indexing. The equidistant points make a good choice in the middle of an interval, but not near its ends, so in this paper Chebyshev points are constructed to improve convergence at the ends of the interval. The numerical examples are given, obtained using the software package MATLAB.

Key words: polynomial interpolation, Lagrange interpolation, barycentric formula, equidistant points, Chebyshev points

1. Uvod

Problem aproksimacije funkcije objedinjuje matematičke probleme koji se pojavljuju kad se funkciju f na skupu S zamjenjuje nekom drugom funkcijom φ , na istom skupu, tako da su one bliske u nekom smislu. Ovo upućuje na neke probleme koje pritom treba riješiti, kao što su egzistencija i jedinstvenost rješenja, mjerenje pogreške, konstrukcija algoritma za računanje najbolje aproksimacije, te dokaz efikasnosti algoritma.

Problem aproksimacije javlja se u dva različita konteksta. Prvo, ako je funkcija f poznata, no njena je forma komplicirana, a time i algoritam za računanje funkcijskih vrijednosti. To zahtijeva puno memorijskog prostora i procesorskog vremena, pa se u tom slučaju računaju funkcijske vrijednosti u određenom broju točaka, a zatim se njenu vrijednost u svakoj drugoj točki aproksimira vrijednošću aproksimacijske funkcije φ . Ocjenu greške se lako dobije iz odnosa obiju funkcija u danoj točki. U drugom slučaju funkcija f nije poznata, poznat je neki skup podataka, na primjer, vrijednosti funkcije na određenom skupu točaka. Ovaj slučaj je čest u praksi, mjerenjem se dobiva skup uređenih parova, a neizmjerene podatke se dobiva aproksimacijom. Ocjenu greške se ne može dobiti bez dodatnih informacija o nepoznatoj funkciji, a česte su i greške pri mjerenim podacima.

Ovdje će biti načinjen pregled Lagrangeovog oblika interpolacijskog polinoma zapisanog preko baricentričke formule, vidi [1]. Postavlja se pitanje točnosti spomenute interpolacije. Problem se rješava na način da se za neku funkciju promatraju interpolacijski polinomi za različit odabir točaka interpolacije. Provesti će se analiza točnosti interpolacije na ekvidistantnim i neekvidistantnim točkama.

2. Interpolacija polinomima

Opći oblik aproksimacijske funkcije φ je

$$\varphi(x) = \varphi(x, a_0, a_1, \dots, a_m),$$

gdje su $a_j, j = 0, \dots, m$ parametri koje treba odrediti po nekom kriteriju. Najčešće korišteni oblik je linearna aproksimacijska funkcija

$$\varphi(x) = a_0\varphi_0(x) + a_1\varphi_1(x) + \dots + a_m\varphi_m(x), \quad (1)$$

gdje su $\varphi_j, j = 0, \dots, m$ poznate funkcije i pri čemu se linearnost ne odnosi na oblik funkcije, već na njenu ovisnost o parametrima a_j koje treba izračunati.

Kriteriji aproksimacije određuju aproksimacijsku funkciju na taj način da se bira funkcija koja najbolje, ovisno o metodi, zadovoljava tražene uvjete. Jedan

od zahtjeva je *interpolacija*, odnosno zahtjev da se vrijednosti funkcija f i φ podudaraju na nekom konačnom skupu točaka ili *čvorovima interpolacije*. Ovo je ujedno i najjednostavniji oblik interpolacije, budući se može postaviti zahtjev da se poklapaju i vrijednosti nekih derivacija u točkama. *Minimizacija pogreške* vodi do *najbolje aproksimacije po normi*, pri čemu je zahtjev minimiziranje odabrane *norme* pogreške

$$e(x) = f(x) - \varphi(x), \quad (2)$$

u odabranom vektorskom prostoru funkcija definiranih na nekom diskretnom ili kontinuiranom skupu S .

Problem aproksimacije sveden na problem polinomne interpolacije, je odabir aproksimacijske funkcije (1) u obliku algebarskog polinoma, pri čemu su $\varphi_j(x) = x^j, j = 0, \dots, m$. Polinom se obično zadaje stupnjem m i koeficijentima a_j u nekoj bazi vektorskog prostora polinoma stupnja ne većeg od m . Zapis funkcije φ nije nužan u bazi običnih potencija $\{1, x, \dots, x^m\}$, tzv. *standardnoj bazi*, već može biti i u nekoj drugoj bazi. Tako se može odabrati i baza ortogonalnih polinoma $\{1, (x - x_0), (x - x_0)(x - x_1), \dots\}$, što je bitno pogodnije od odabira standardne baze. Neka je promatrana funkcija f neprekidna na segmentu $[a, b]$, zadana na diskretnom skupu različitih točaka $x_j, j = 0, \dots, n$ za koje su poznate funkcijske vrijednosti

$$f_j = f(x_j), j = 0, \dots, n. \quad (3)$$

Točke $x_j, j = 0, \dots, n$, obično su numerirane tako da vrijedi $a \leq x_0 < x_1 < \dots < x_n \leq b$.

Treba naći polinom p , minimalnog stupnja, koji se podudara s funkcijom f u zadanim točkama (x_j, f_j) , po (3). Sljedeći teorem govori o egzistenciji i jedinstvenosti takvog interpolacijskog polinoma.

Teorem 1.1. Za zadane točke $(x_j, f_j), j = 0, \dots, n$, pri čemu je $x_i \neq x_j$ za $i \neq j$, postoji jedinstveni interpolacijski polinom p , stupnja najviše n , takav da je

$$p(x_j) = f_j, j = 0, \dots, n. \quad (4)$$

Dokaz. Vidi [3, str.143-144]; vidi [5, str.1-2].

Interpolaciju polinomom može se promatrati kroz dvije faze, a to su određivanje koeficijenata polinoma i izvednjavanje u točkama koje nisu čvorovi interpolacije, pri čemu se ocjenjuju algoritmi računanja u smislu broja operacija i stabilnosti. Interpolacijski čvorovi, njih $n + 1$, određuju jedan i samo jedan polinom u $(n+1)$ – dimenzionalnom vektorskom prostoru polinoma P_n . Naime, s bazom polinoma $\{b_0, b_1, \dots, b_n\}$ stupnja manjeg ili jednakog n i prema teoremu

2.1., postoji jedinstveni polinom p koji interpolira zadane točke. Polinom ima jedinstveni prikaz kao linearnu kombinaciju polinoma odabrane baze u P_n

$$p(x) = \sum_{j=0}^n a_j b_j(x), \quad (5)$$

gdje su a_j koeficijenti polinoma koje treba odrediti. Uvrštavanjem interpolacijskih čvorova u (5) dobiva se konzistentan linearni sustav reda $n + 1$, jer je matrica sustava regularna matrica. Ovdje se nameće pitanje izbora baze i pronalaska koeficijenata polinoma p u toj bazi, tako da algoritam bude stabilan, što jednostavniji i brži, odnosno da se smanji broj izvršavanja operacija. Na primjer, u prvoj fazi izbor standardne baze i rješavanje linearnog sustava Cramerovim pravilom, vidi [10], vodi na rješavanje Vandermondeovih determinanata, vidi [6], što izgleda prihvatljivo. No, matrica sustava može imati skoro linearno zavisne retke, time je loše uvjetovana, što je nepovoljno u smislu aritmetike konačne preciznosti računala, pa ovaj pristup ne vodi na stabilan algoritam. Postoji nekoliko pristupa spomenutom problemu, o odnosu baze i koeficijenata, te izvrednjavanja, a jedan od njih primijenjen je u Lagrangeovom obliku interpolacijskog polinoma. Izbor Lagrangeove baze, gdje su svi polinomi baze stupnja n , vodi na linearni dijagonalni sustav koji se lako računa, no u ovom slučaju izvrednjavanje je sporo. Dakle, kao što je i najavljeno temom rada, daljnje razmatranje biti će usmjereno na poboljšanje izvrednjavanja primjenom baricentričke forme Lagrangeovog interpolacijskog polinoma.

3. Lagrangeov oblik interpolacijskog polinoma

Interpolacijski polinom p iz (5) može se zapisati u obliku

$$p(x) = \sum_{j=0}^n f_j l_j(x), \quad (6)$$

uz odabir Lagrangeove baze $\{l_0, \dots, l_n\}$ prostora polinoma P_n

$$l_j(x) = \frac{\prod_{k=0, k \neq j}^n (x - x_k)}{\prod_{k=0, k \neq j}^n (x_j - x_k)}. \quad (7)$$

Lagrangeovi polinomi l_j su stupnja n , čime je odabran pristup računanju polinoma preko složenije baze i jednostavnijih koeficijenata, pri čemu koeficijenti jednostavno ovise o čvorovima interpolacije i uzeti su tako da su jednaki zadanim funkcijskim vrijednostima f_j . Za polinome l_j u čvorovima x_j vrijedi

$$l_j(x_k) = \begin{cases} 1, & j = k \\ 0, & j \neq k, j, k = 0, \dots, n, \end{cases}$$

pa se suma (6) u čvorovima svodi na početni zahtjev interpolacije (4). Polinom iz (6) stupnja je najviše n i zajedno s (7) naziva se Lagrangeov oblik interpolacijskog polinoma. Ovaj oblik koristi se za mali n broj čvorova, nije praktičan u primjeni i uglavnom se koristi u teoretske svrhe, za dokazivanje teorema. Svako računanje $p(x)$ zahtijeva $O(n^2)$ zbrajanja i množenja, a dodavanje čvora interpolacije (x_{n+1}, f_{n+1}) zahtijeva novo računanje interpolacijskog polinoma i računanje je numerički nestabilno. Ovi razlozi upućuju na korištenje neke druge interpolacije ili u okviru polinomne interpolacije, na korištenje Newtonovog oblika interpolacijskog polinoma. Osim ovog izbora, postoji oblik interpolacijskog polinoma koji se zove se *baricentrička formula*, a dobiva se iz Langrangeovog (6), zapisom polinoma Langrangeove baze (7) u obliku

$$l_j(x) = \frac{\omega_j}{\sum_{k=0}^n \frac{\omega_k}{x - x_k}}, j = 0, \dots, n. \quad (8)$$

Ovaj zapis vrijedi za $x \neq x_j$, što nije bitno ograničenje, jer je $p(x_j) = f_j$, pa polinom l_j ne treba računati u čvorovima interpolacije. Također, za računanje polinoma (8) treba definirati vrijednosti *baricentričkih težina* ω_j , pa je

$$\omega_j = \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^n \frac{1}{x_j - x_k}, j = 0, \dots, n, n \in \mathbb{N}. \quad (9)$$

Računanje težina ω_j čvorova interpolacije može se izvoditi rekurzivno, smanjujući tako broj dijeljenja, na taj način da se pri računanju težine ω_j spremaju u trokutastu matricu. Po (9) definiciji težina ω_j , sljedećim algoritmom računaju se $\omega_j = \omega_j^{(n)}, j = 0, \dots, n$, gdje (n) označava redak matrice, odnosno težine pripadnog čvora.

Algoritam 3.1. $\omega_0^{(0)} = 1$;

za $j = 1 : n$

za $k = 0 : j - 1$

$$\omega_k^{(j)} = (x_k - x_j) \omega_k^{(j-1)};$$

$$\omega_j^{(j)} = \prod_{k=0}^{j-1} (x_j - x_k);$$

za $j = 0 : n$

$$\omega_j^{(n)} = 1 / \omega_j^{(n)};$$

Prednost baricentričke formule je mogućnost brzog generiranja $\omega_j^{(k)}$ iz $\omega_j^{(k-1)}$

$$\omega_j^{(k)} = \frac{\omega_j^{(k-1)}}{x_j - x_k}, \quad \omega_k^{(k)} = -\sum_{j=0}^{k-1} \omega_j^{(k)}, \quad j = 0, \dots, k-1, \quad (10)$$

za $k = 1, \dots, n$, što odgovara dodavanju novog čvora interpolacije x_k , odnosno, nove točke (x_k, f_k) pri prijelazu s polinoma p_{k-1} na p_k . Svako računanje $p(x)$ zahtijeva $O(n^2)$ operacija, a dodavanje novog čvora interpolacije, prema (10), zahtijeva $O(n)$ operacija.

Grešku interpolacije (2) je lako ocijeniti kada je funkcija f dovoljno glatka. Osnovni rezultat je dan sljedećim teoremom.

Teorem 3.1. Neka je $f \in C^{n+1}([a, b])$ zadana funkcija i neka su $x_0, x_1, \dots, x_n \in [a, b]$ međusobno različite točke. Neka je $p \in P_n$ polinom koji interpolira funkciju f u točkama x_0, x_1, \dots, x_n . Onda za svako $x \in [a, b]$ postoji točka $\xi_x \in (a, b)$ takva da je

$$f(x) - p(x) = \frac{1}{(n+1)!} f^{(n+1)}(\xi_x) \prod_{j=0}^n (x - x_j).$$

Posebno, vrijedi sljedeća ocjena

$$|f(x) - p(x)| \leq \frac{1}{(n+1)!} \max_{a \leq t \leq b} |f^{(n+1)}(t)| \prod_{j=0}^n |x - x_j|. \quad (11)$$

Dokaz. Vidi [6, str.79-81].

Postavlja se pitanje *konvergenije* interpolacijskog polinoma prema funkciji, odnosno vrijedi li

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \max_{a \leq x \leq b} |f(x) - p_n(x)| = 0$$

Ukoliko se uzmu *ekvidistantne točke* x_j na segmentu $[a, b]$,

$$x_j = a + j \frac{b-a}{n}, \quad j = 1, \dots, n,$$

prema teoremu 3.1. dolazi se do ocjene greške

$$|f(x) - p(x)| \leq \frac{c}{(n+1)!} \frac{e^{-n}}{\sqrt{n \ln(n)}} (b-a)^{n+1} \max_{a \leq t \leq b} |f^{(n+1)}(t)|, \quad (12)$$

pri čemu je c konstanta neovisna o n , takva da je

$$\max_{a \leq x \leq b} \prod_{j=0}^n |x - x_j| \leq c \frac{e^{-n}}{\sqrt{n \ln(n)}} (b-a)^{n+1}$$

Probleme koji nastaju kod interpolacije na ekvidistantnoj mreži čvorova prvi je uočio Runge, konstruirajući *Rungeovu funkciju* (vidi [6],[2]), koja ima svojstvo da interpolacijski polinomi na ekvidistantnoj mreži ne konvergiraju prema toj funkciji kad se broj čvorova povećava.

Primjer 3.1. Rungeova funkcija $f(x) = \frac{1}{1+x^2}$ na simetričnom intervalu $[-b, b]$. Može se pokazati da za svako $k \in \mathbb{N}$, $\max |f^{(k)}(x)| \leq k!$, pa iz (12) slijedi,

$$|f(x) - p(x)| \leq c \frac{e^{-n}}{\sqrt{n \ln(n)}} (2b)^{n+1} = 2b \frac{1}{\sqrt{n \ln(n)}} \left(\frac{2b}{e} \right)^n. \quad (13)$$

Iz (13) se vidi da je uniformna konvergencija osigurana samo za $2b < e$. Za dovoljno velike b interpolacijski proces više ne konvergira. Kasnije će biti dan numerički primjer koji će pokrijepiti izrečene tvrdnje.

Primjer 3.2. Funkcija $f(x) = e^x$ na intervalu $[a, b]$. Za svako $k \in \mathbb{N}$, $\max |f^{(k)}(x)| \leq e^b$ i uvijek vrijedi $\max_{a \leq x \leq b} \prod_{j=0}^n |x - x_j| \leq (b-a)^{n+1}$

$$\max_{a \leq x \leq b} |f(x) - p(x)| \leq \frac{(b-a)^{n+1}}{(n+1)!} e^b.$$

Desna strana teži u nulu kada $n \rightarrow \infty$ i dobiva se uniformna konvergencija interpolacijskog polinoma.

Može se pokazati (vidi [6],[8]) da za bilo koji izbor interpolacijskih točaka x_0, x_1, \dots, x_n postoji neprekidna funkcija takva da $L_n(f)$ ne konvergira uniformno prema f kada $n \rightarrow \infty$, pri čemu je $L_n(f)$ linearan operator na prostoru neprekidnih funkcija $C([a, b])$, koji funkciji f pridružuje interpolacijski polinom p . Iz ovog se lako može zaključiti da postupak interpolacije nije prikladan za aproksimaciju funkcija. Naime, u praksi se obično koriste interpolacijski polinomi niskih stupnjeva, do stupnja 5, a umjesto viših stupnjeva koristi se po dijelovima polinomna interpolacija. Svojstva interpolacijskog polinoma mogu se popraviti ispravnim odabirom interpolacijskih točaka, što nije i jedini faktor, drugi faktor je glatkoća funkcije. Na primjeru Rungeove funkcije, ako se umjesto interpolacije na ekvidistantnoj mreži uzme neekvidistantna mreža, točnije Čebiševljeve

točke, onda će porastom stupnja niz interpolacijskih polinoma konvergirati prema funkciji f . Kontrolirajući točke interpolacije može se kontrolirati funkcija $\prod_{j=0}^n (x - x_j)$ koja se pojavljuje u izrazu (11) za grešku interpolacije. Postavlja se pitanje nalaženja točaka interpolacije koje će dati najmanji $\max_{a \leq x \leq b} \prod_{j=0}^n |x - x_j|$.

Pokazuje se da je dobro da točke interpolacije budu gušće na krajevima intervala, te je optimalan izbor dan nultočkama Čebiševljevim polinoma.

4. Čebiševljeve točke

Kao što je ranije rečeno, točnost interpolacije ovisi o čvorovima interpolacije, ali i ne samo o tome. Postoji klasa funkcija kod koje nije pogodna primjena polinomne interpolacije na ekvidistantnoj mreži. Najbolji primjer je Lagrangeova interpolacija Rungeove funkcije prikazane primjerom 3.1. Takve i slične funkcije imaju polove u kompleksnoj ravnini, blizu ruba intervala interpolacije, pa prilikom interpoliranja na ekvidistantnim mrežama može doći do akumuliranja grešaka i loše konvergencije.

Interpolacija polinomima u baricentričkoj formi daje mogućnost korištenja neekvidistantnih točaka, odnosno Čebiševljevih točaka, koje omogućuju dobivanje dovoljno dobre interpolacije.

Čebiševljeve točke su nul-točke Čebiševljevih polinoma [vidi 14, str. 51-101]. Čebiševljevi polinomi prvog reda definirani su jednadžbom

$$T_k(x) = \cos[k \cos^{-1}(x)], \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (14)$$

Polinom napisan izrazom (14) ima vrijednost nula onda kada je

$$k \cdot \cos^{-1}(x) = \frac{\pi}{2} \pm j\pi. \quad (15)$$

Prema tome, za $k = n+1$, polinom (14) daje Čebiševljeve točke [14, str. 55-58].

$$x_j = \cos \frac{(2j+1)\pi}{2n+2}, \quad j = 0, 1, \dots, n. \quad (16)$$

Težinski faktor definiran na Čebiševljevim točkama računa se po

$$\omega_j = (-1)^j \sin \frac{(2j+1)\pi}{2n+2}, \quad j = 0, 1, \dots, n. \quad (17)$$

i zahtijeva $O(n)$ operacija.

5. Numerički primjeri

Primjer 5.1. Računanje polinomne interpolacije p_n zadane funkcije f , definirane na segmentu $[a, b]$, na zadanoj mreži čvorova $M_n = \{x_i \mid i = 0, \dots, n\}$ sadržanoj u $[a, b]$. Čvorovi ne moraju biti uzlazno numerirani, ali je zato algoritam organiziran tako da se dodavanjem novog čvora interpolacije lako računa i novi interpolacijski polinom, što znači primjenom baricentričke formule. Drugim riječima, algoritam interpolacije počinje na mreži $M_0 = \{x_0\}$ i generira pripadni interpolacijski polinom p_0 . Zatim, redom generira mreže $M_k = M_{k-1} \cup \{x_k\}$, a p_k računa iz p_{k-1} , sve do $k = n$. Vidi numeričke primjere u [4], [7]. Cilj programa je ispitivanje stabilnosti ovog algoritma za generiranje vrijednosti $\omega_i^{(k)}$, prema (10). Ove vrijednosti, očito ovise samo o mreži čvorova M_n , s tim da je bitno indeksiranje čvorova (poredak odgovara redoslijedu dodavanja). Algoritam za rješavanje ovog numeričkog primjera napravljen je korištenjem programskog paketa MATLAB, vidi [9], programiranjem funkcija koje izvršavaju sljedeće zadatke:

- (a) Za zadanu mrežu čvorova M_n generira cijelu tablicu vrijednosti $\omega_i^{(k)}$ u dvije različite točnosti, jednostrukoj i dvostrukoj. Interpolacijski polinomi u ovom primjeru koriste vrijednosti u dvostrukoj preciznosti, jer se lako može vidjeti da vrijednosti u nižim točnostima imaju relativne greške u odnosu na odgovarajuće vrijednosti u višoj točnosti.
- (b) Izvršava ovaj program za ulazno numerirane ekvidistantne mreže

$$x_i = -1 + \frac{2i}{n}, \quad i = 0, \dots, n,$$

za $n = 5, 10, 15, 20$. Zatim preuređuje čvorove tako da redoslijed bude “izvana prema sredini” s oba kraja, na primjer, u poretku

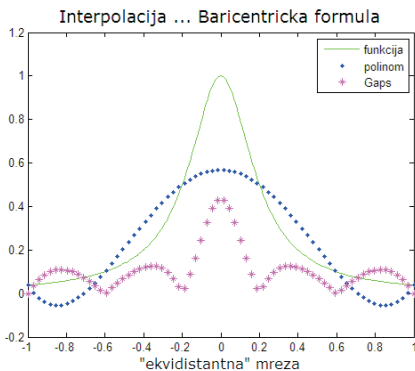
$$x_i = \begin{cases} -1 + \frac{i}{n}, & i \text{ paran}, \\ 1 - \frac{i-1}{n}, & i \text{ neparan}, \end{cases} \quad i = 0, \dots, n.$$

- (c) Pri računanju baze interpolacijskog polinoma za ekvidistantne čvorove, u aritmetici konačne preciznosti, oduzimaju se bliže vrijednosti i množe male vrijednosti pa se greška akumulira. Kod “izvana prema sredini” mreži čvorova, vrijednosti su udaljenije, pa je time preciznost veća.
- (d) Izvršava ovaj program na Čebiševljevim točkama.

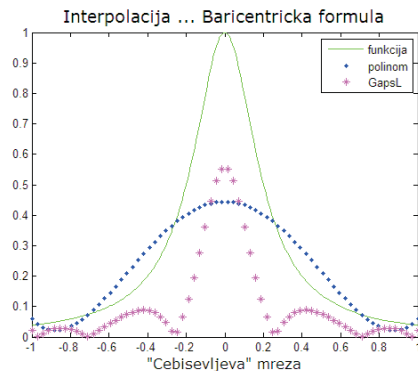
Za odabranu funkciju f , nalazi interpolacijske polinome na mrežama iz (b) i (c), te uspoređuje maksimalne apsolutne greške na cijelom intervalu koji sadrži čvorove, ovisno o poretku čvorova u mreži.

Za ovaj primjer odabrane su dvije funkcije.

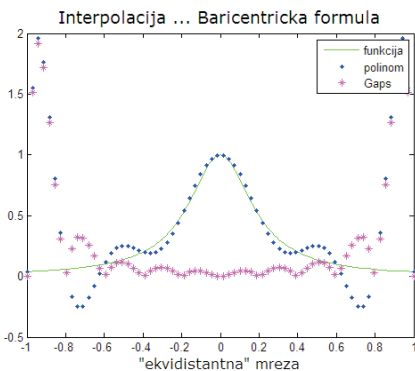
1. Interpolacijski polinomi za Rungeovu funkciju $f(x) = \frac{1}{1+25x^2}$, prikazani grafovima, na evidistantnim točkama (lijevo) i Čebiševljevim točkama (desno) i pripadnim apsolutnim greškama (G_{aps}) polinoma u odnosu na originalnu funkciju.



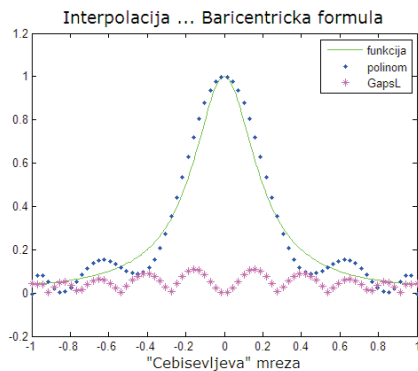
Slika 1. Interpolacija za $n=5$



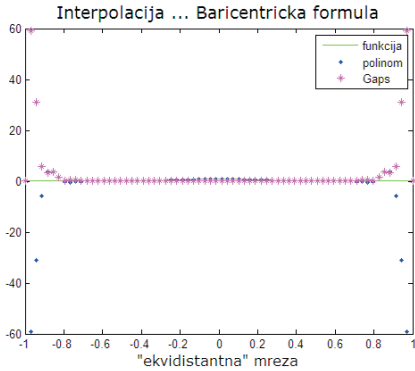
Slika 2. Interpolacija za $n=5$



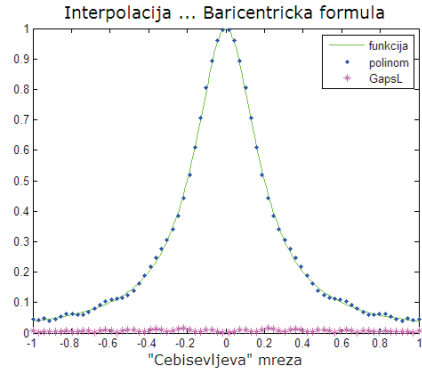
Slika 3. Interpolacija za $n=10$



Slika 4. Interpolacija za $n=10$



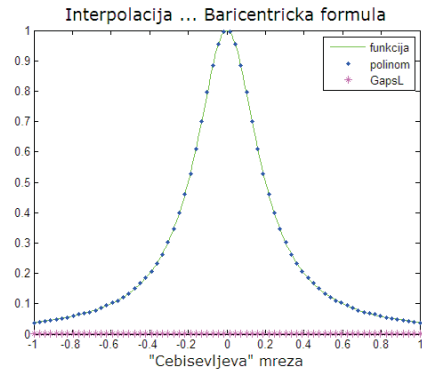
Slika 5. Interpolacija za $n=20$



Slika 6. Interpolacija za $n=20$

Broj čvorova n	Ekvidistantna mreža G_{aps}	Čebiševljeva mreža G_{aps}
5	0.4278	0.5509
10	1.9145	0.1089
15	2.0426	0.0804
20	59.0187	0.0153
30*	1.7348×10^3	0.0024

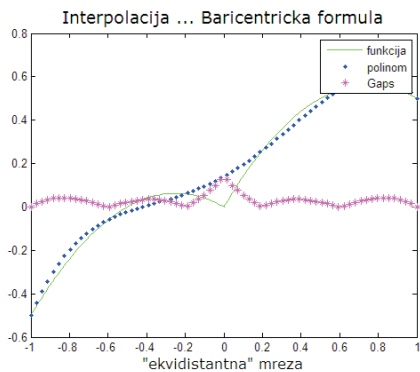
Tabela 1. Greške interpolacije



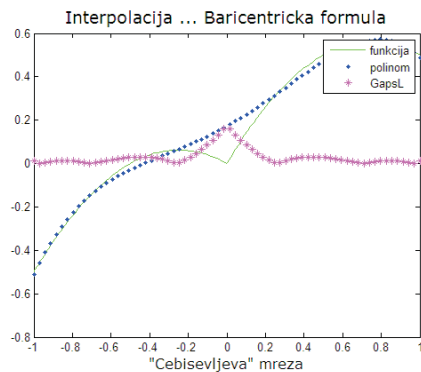
Slika 7. Interpolacija za $n=30$

Ovim primjerima, kao i sljedećim, potkrijepljena su ranija teorijska razmatranja i zaključci vezani za polinomnu interpolaciju na ekvidistantnim i neekvidistantnim mrežama. Promatranjem grafova funkcija i pripadnih interpolacijskih polinoma, te tablica grešaka interpolacije, može se zaključiti da je ekvidistantna mreža dobrih svojstava aproksimacije u sredini intervala, ali ne i na rubovima. Izbor neekvidistantne mreže, s čvorovima koji su bliže rubovima intervala, može se popraviti konvergenciju. Kao što je već spomenuto, konstruiranjem Čebiševljeve mreže, funkcija se bolje aproksimira interpolacijskim polinomom, no to nije moguće napraviti za svaku neprekidnu funkciju.

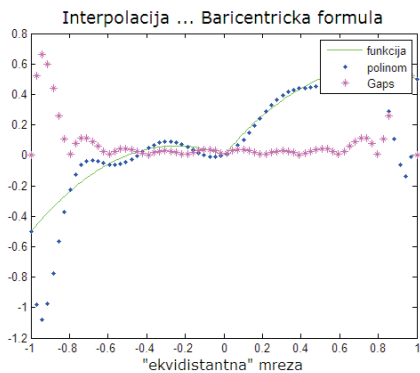
2. Interpolacijski polinomi za funkciju $f(x) = |x| + \frac{x}{2} - x^2$, prikazani grafovima, na evidistantnim točkama (lijevo) i Čebiševljevim točkama (desno) i pripadnim apsolutnim greškama (G_{aps}) polinoma u odnosu na originalnu funkciju.



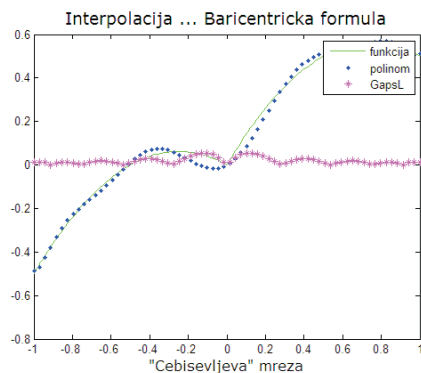
Slika 8. Interpolacija za $n=5$



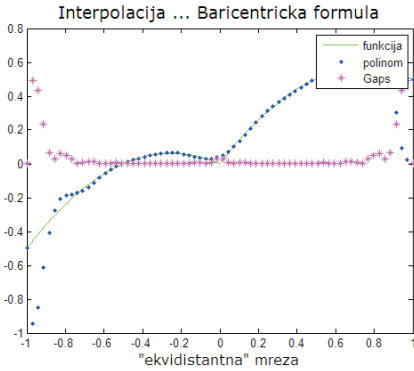
Slika 9. Interpolacija za $n=5$



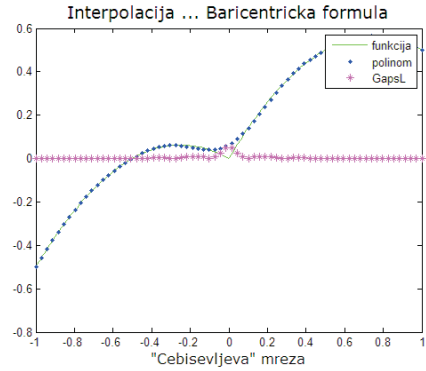
Slika 10. Interpolacija za $n=10$



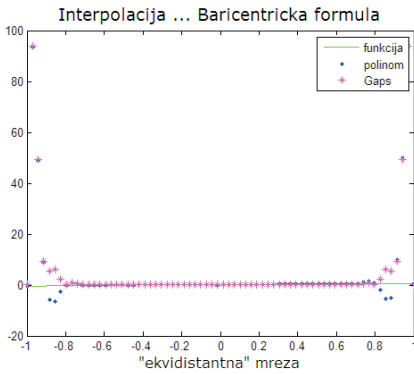
Slika 11. Interpolacija za $n=10$



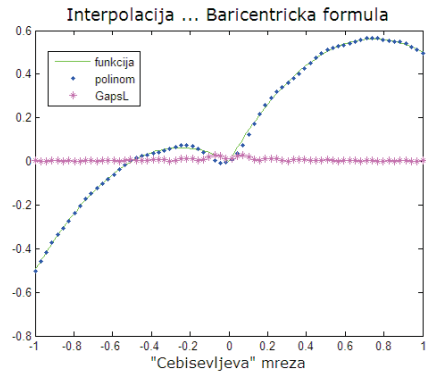
Slika 12. Interpolacija za $n=15$ na "ekvidistantna" mreža



Slika 13. Interpolacija za $n=15$ na "Čebisevljeva" mreža



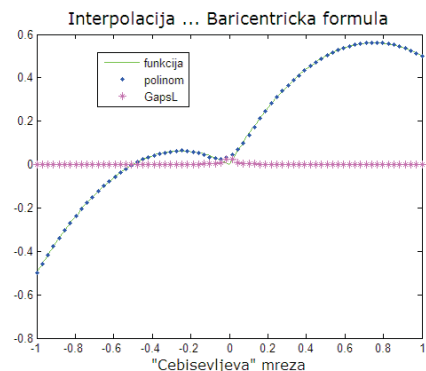
Slika 14. Interpolacija za $n=20$ na "ekvidistantna" mreža



Slika 15. Interpolacija za $n=20$ na "Čebisevljeva" mreža

Broj čvorova n	Ekvidistantna mreža G_{aps}	Čebisevljeva mreža G_{aps}
5	0.1264	0.1857
10	0.6631	0.0591
15	0.4897	0.0529
20	93.9364	0.0292
30*	2.2965×10^4	0.0198

Tabela 2. Greške interpolacije



Slika 16. Interpolacija za $n=30$ na "Čebisevljeva" mreža

6. Zaključak

Provedena analiza točnosti Lagrangeovog oblika interpolacijskog polinoma, zapisanog preko baricentričke formule, daje zanimljive rezultate. Točnost interpolacije ovisi o odabiru čvorova interpolacije. Odabir ekvidistantne mreže, za neke funkcije, može biti loš odabir. Interpolacijski polinom na ekvidistantne mrežama je dobra aproksimacija funkcije na sredini intervala, ali ne i na rubovima. Odabir neekvidistantne mreže, odnosno Čebiševljevih točaka, omogućuje dobru aproksimaciju funkcije i na krajevima intervala.

7. Literatura

- [1] J.P. Berrut, R. Baltensperger, H.D. Mittelmann. *Recent Development in Barycentric Rational Interpolation*. International Series of Numerical Mathematics, **151**: 27-51. Birkhäuser, Basel, 2005.
- [2] J.P. Berrut, R. Trefethen. *Barycentric Lagrange Interpolation*. Siam Review, **46**, No. 3: 501-517. 2004.
- [3] W. Cheney, D. Kincaid. *Numerical Mathematics and Computing*. Thomson, Belmont, 2004.
- [4] M.S. Floater, K. Hormann. *Barycentric Rational Interpolation with no poles and High Rates of Approximation*. IfI Technical Report Series, **06**: 1-15, 2006.
- [5] W. Gander. *Change of basis in polynomial interpolation*. Numerical Linear Algebra and Applications, **00**: 1-6, 2000.
- [6] W. Gautschi. *Numerical Analysis*. Birkhäuser, Boston, 1997.
- [7] N.J. Higham. *The numerical stability of barycentric Lagrange interpolation*. IMA Journal of Numerical Analysis, **24**: 547-556, 2004.
- [8] S. Kurepa. *Konačno dimenzionalni vektorski prostori*. Školska knjiga, Zagreb, 1988.
- [9] C.B. Moler. *Numerical Computing with MATLAB*. Siam, Philadelphia, 2004.
- [10] J. Stoer, R. Bulirsch. *Introduction to Numerical Analysis*. Springer, New York, 2002.

Numerička analiza aproksimacija derivacije metodom konačnih razlika

Numerical analysis of derivative approximation using the finite difference method

Leo Škec*, Nermina Mujaković**, Ivan Dražić***

Sažetak. U radu se razmatra numeričko deriviranje s teorijskog i praktičnog aspekta. U prvom dijelu rada analiziraju se osnovni principi numeričkog deriviranja funkcije zadane u konačno mnogo točaka. U drugom dijelu rada uspoređene se neke od metoda za numeričko deriviranje (metode konačnih razlika unaprijed, unazad i centralnih konačnih razlika). Izvedene su i formule za aproksimaciju derivacija prvog, drugog i višeg reda te različitih redova točnosti, kao i formule za ocjenu grešaka aproksimacija, što rezultira zaključcima o prednostima i nedostacima dobivenih formula i mogućnostima njihove primjene. U zadnjem dijelu rada, koristeći računalni sustav Mathematica, izvedeni su moduli za numeričko deriviranje konačnim razlikama unaprijed, unazad i centralnim konačnim razlikama koji su primijenjeni na jednu trigonometrijsku funkciju i jedan polinom. Dobiveni rezultati prezentirani su tabelarno i grafički uz analizu grešaka.

Ključne riječi: numeričko deriviranje, analiza greške, konačne razlike

Abstract. In the paper we discuss the numerical differentiation from the theoretical and practical aspects. In the first section we analyse the basic principles of numerical derivation of functions which are defined as a finite number of points. In the second part of the work we compare some of the methods for numerical differentiation (forward finite differences, backward and central finite differences). The formulas for approximating the derivative of first, second and higher order

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Viktora Cara Emina 5, 51000 Rijeka
E-mail: leo.skec@gradri.hr

** Odjel za matematiku Sveučilišta u Rijeci, Omladinska 14, 51000 Rijeka
E-mail: mujakovic@inet.hr

*** Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Vukovarska 58, 51000 Rijeka
E-mail: idrazic@riteh.hr

with different orders of accuracy, as well as the formulas for evaluating the approximation error are derived, resulting in conclusions about the advantages and disadvantages of the derived formulas and their potential application. In the last part of the paper, we construct the forward, backward and central finite difference modules for numerical differentiation using the computer system “Mathematica”. These modules are applied to one trigonometric and one polynomial function and the results obtained are presented in tables and graphs together with the error analysis.

Key words: numerical differentiation, error analysis, finite differences

1. Uvod

U ovom radu promatramo numeričko deriviranje sa teorijskog i praktičnog aspekta. U teoretskom dijelu rada obrađujemo i uspoređujemo neke od metoda za numeričko deriviranje uz pripadajuće ocjene grešaka. Također izvodimo izraze za aproksimaciju prve i druge derivacije različitih redova točnosti te komentiramo njihove prednosti i nedostatke. U praktičnom dijelu koristeći računalni sustav *Mathematica* izrađujemo module za numeričko deriviranje trima različitim metodama koje primjenjujemo na dvije funkcije različitog tipa i analiziramo njihovu točnost.

2. Deriviranje vs. numeričko deriviranje

Numeričko deriviranje tehnika je numeričke analize koja daje aproksimaciju vrijednosti derivacije funkcije izračunate pomoću funkcijskih vrijednosti u konačno mnogo točaka. Kada analitički izraz za derivaciju funkcije nije poznat i ako su umjesto funkcije poznate samo neke njene funkcijske vrijednosti derivaciju možemo računati samo numerički te pretpostavljamo da je funkcija koju deriviramo derivabilna.

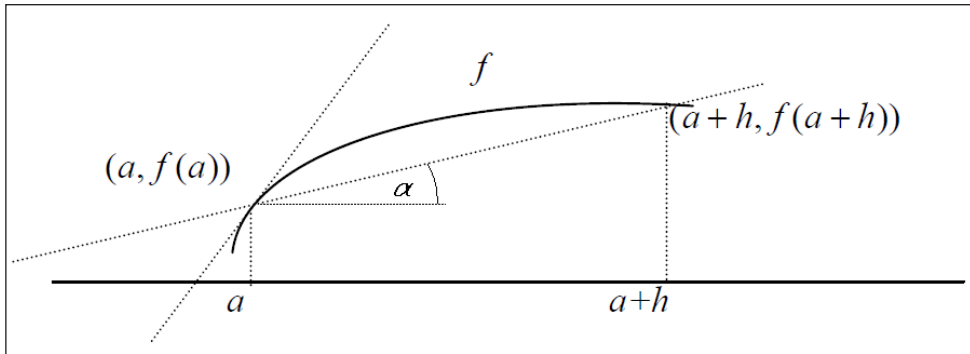
Aproksimacija derivacija (prve, druge i derivacija viših redova) numeričkim metodama nailazi na široku primjenu u modernoj znanosti prilikom matematičkog modeliranja različitih pojava i procesa.

2.1. Definicija derivacije funkcije

Derivaciju funkcije $y = f(x)$ u točki $x = a$ analitički definiramo izrazom

$$f'(a) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h}. \quad (1)$$

Do objašnjenja ovog izraza se može lako doći razmatrajući slijedeću sliku:



Slika 1. Geometrijski smisao derivacije funkcije

Koeficijent smjera pravca sekante kroz dvije točke sa koordinatama $(a, f(a))$ i $(a+h, f(a+h))$ dobiva se po formuli

$$\tan \alpha = \frac{f(a+h) - f(a)}{(a+h) - a} = \frac{f(a+h) - f(a)}{h}. \quad (2)$$

Točka $(a+h, f(a+h))$ predstavlja okolnu točku točke $(a, f(a))$ koja joj se približava kako $h \rightarrow 0$. Kada je $h = 0$ sekanta kroz dvije točke postaje pravac koji dodiruje funkciju $y = f(x)$ samo u točki $(a, f(a))$ i koji se naziva tangentom funkcije $y = f(x)$ u točki $x = a$. Iz toga slijedi da koeficijent smjera tangente u nekoj točki funkcije dobivamo kao graničnu vrijednost koeficijenta smjera sekante koja prolazi kroz tu točku kada međusobni razmak točaka teži ka nuli. Dakle, u geometrijskom smislu, derivacija funkcije $y = f(x)$ u točki $x = a$ predstavlja koeficijent smjera tangente na funkciju $y = f(x)$ u točki s apscisom $x = a$.

2.2. Numeričko deriviranje konačnim razlikama unaprijed, unazad i centralnim konačnim razlikama

Iz formule (1) i objašnjenja geometrijskog smisla derivacije funkcije vidi se kako je derivaciju $f'(a)$ moguće aproksimirati izrazom (2) kada je korak h dovoljno malen. Kako su, za dovoljno male razmake između točaka h , sekante vrlo bliske tangenti, logično je očekivati da su koeficijenti smjera sekante dobiveni korištenjem formule (2) dovoljno dobre aproksimacije derivacije funkcije. Iz toga očito slijedi da se smanjenjem udaljenosti h između točaka postiže bolja aproksimacija derivacije funkcije. Dakle, može se pisati

$$f'(a) \approx \frac{f(a+h) - f(a)}{h}. \quad (3)$$

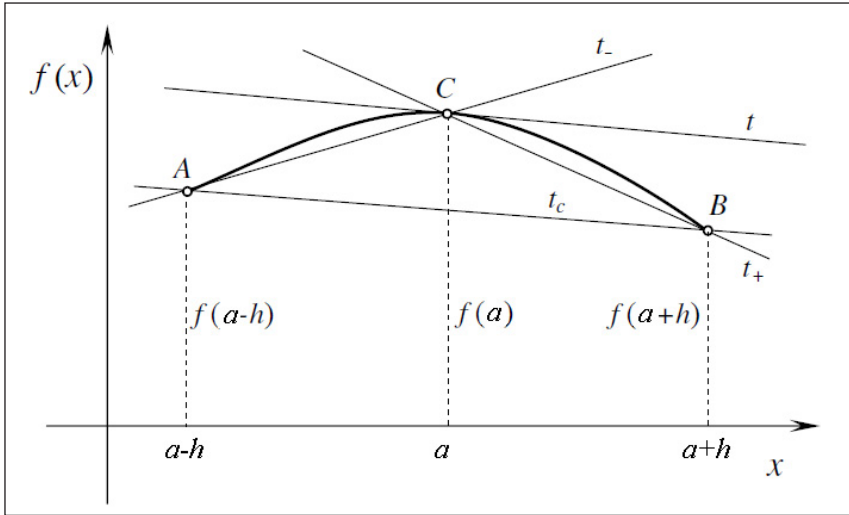
Pretpostavlja se da je $h > 0$. Izraz (3) predstavlja formulu za **aproksimaciju derivacije konačnim razlikama unaprijed** (*forward difference* [2]) zato što se, prema slici 1., okolna točka odabire desno od točke $(a, f(a))$, odnosno apscisa okolne točke $(a+h, f(a+h))$ veća je od apscise točke $(a, f(a))$. Obično se pri odabiru koraka h govori da on mora biti “dovoljno malen”, a ne npr. “što manji”. Razlog tome je slijedeći: Ukoliko se odabere premalen korak h , pojavljuje se greška zaokruživanja, te se prilikom oduzimanja članova u nazivniku izraza (3) oni poništavaju i daju nulu. Ako se pak korak h odabere prevelik koeficijent smjera sekante koji dobivamo nije dovoljno točna aproksimacija derivacije, odnosno koeficijenta smjera tangente [1]. Dakle, smanjivanjem koraka h numeričko rješenje približava se egzaktnom rješenju i greška se smanjuje, ali sve do određene granice kada se h previše smanji, nakon čega se greška počinje povećavati. Pri računanju numeričkih derivacija ovog tipa trebalo bi težiti odabiru takvog koraka h koji će dati najmanju moguću grešku, ali pritom treba imati na umu da se ni greška ne može u nedogled smanjivati, odnosno da postoji određeni “limit” točnosti ovakvih približnih formula.

Do sličnog izraza može se doći kada se okolna točka odabere lijevo od točke $(a, f(a))$. U tom slučaju koordinate okolne točke su $(a-h, f(a-h))$, a izraz za aproksimaciju derivacije dan je na slijedeći način

$$f'(a) \approx \frac{f(a) - f(a-h)}{h}. \quad (4)$$

Izraz (4) predstavlja formulu za **aproksimaciju derivacije konačnim razlikama unazad** (*backward difference* [2]).

Na slici 2 prikazana je grafička interpretacija formula za aproksimaciju derivacije konačnim razlikama unaprijed i unazad, pri čemu koeficijent smjera pravca t odgovara točnoj vrijednosti derivacije $f'(x)$ u točki C . Koeficijent smjera pravca t_- , koji prolazi kroz točke A i C , odgovara formuli za aproksimaciju derivacije konačnim razlikama unazad (4), a koeficijent smjera pravca t_+ , koji prolazi kroz točke A i B odgovara formuli za aproksimaciju derivacije konačnim razlikama unaprijed (3).



Slika 2. Grafička interpretacija formula za aproksimaciju derivacije konačnim razlikama unaprijed, unazad, te centralnim konačnim razlikama

Iz slike se vidi kako bi bolja aproksimacija derivacije $f'(x)$ u točki C bio pravac t_c koji prolazi kroz točke A i B . Koeficijent smjera tog pravca bio bi

$$f'(a) \approx \frac{f(a+h) - f(a-h)}{2h}. \quad (5)$$

Izraz (5) predstavlja formulu za **aproksimaciju derivacije centralnim ili središnjim konačnim razlikama** (*central difference* [2]). Za razliku od formula za deriviranje unaprijed ili unazad koje koriste samo dvije točke (točku $(a, f(a))$ i neku okolnu točku), ova formula koristi tri točke (točku $(a, f(a))$ i po jednu okolnu točku sa svake strane) te zbog toga daje bolju aproksimaciju derivacije $f'(x)$ u točki $x = a$. Općenito, kod formule za deriviranje centralnim razlikama okolne točke ne moraju biti na istoj udaljenosti od središnje točke. U tom slučaju, za okolne točke $(a-h_1, f(a-h_1))$ i $(a+h_2, f(a+h_2))$ može se pisati

$$f'(a) \approx \frac{f(a+h_2) - f(a-h_1)}{h_1 + h_2}. \quad (6)$$

2.3. Ocjena greške numeričkog deriviranja

Ukoliko se želi provjeriti točnost približnih formula za numeričko deriviranje i ocijeniti njihova pogreška (koja očigledno postoji), to se može jednostavno napraviti razvojem funkcije $f(x)$ u Taylorov red u okolini točke $(a, f(a))$ [4]. Vrijedi

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{f''(a)}{2}(x-a)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n + \dots \quad (7)$$

Za deriviranje unaprijed se koristi razvoj

$$f(a+h) = f(a) + h \cdot f'(a) + h^2 \cdot \frac{f''(a)}{2} + \dots + h^n \cdot \frac{f^{(n)}(a)}{n!} + \dots, \quad (8)$$

iz čega se dobiva

$$f'(a) = \frac{f(a+h) - f(a)}{h} - \frac{h}{2} f''(a) - \dots - \frac{h^{n-1}}{n!} f^{(n)}(a) - \dots \quad (9)$$

Ukoliko zanemarimo članove višeg reda, (9) se svodi na (3) za približno računanje derivacije u nekoj točki konačnim razlikama unaprijed. U tom slučaju članovi višeg reda predstavljaju grešku numeričkog deriviranja unaprijed i vrijedi

$$f'(a) = \frac{f(a+h) - f(a)}{h} + O(h), \quad (10)$$

gdje $O(h^n)$ predstavlja funkciju za koju, za dovoljno mali pozitivni korak h , vrijedi $|O(h^n)| \leq C|h^n|$, gdje je C konstanta veća od nule. U ovom slučaju je $n = 1$ te je i red greške također 1.

Uzimajući u obzir Lagrangeov ostatak u Taylorovom razvoju funkcije $f(a+h)$ lako se dobije

$$f'(a) = \frac{f(a+h) - f(a)}{h} - \frac{h}{2} f''(\zeta), \quad (11)$$

gdje je $a < \zeta < a + h$. Greška $e_d(a;h) = -h/2f''(\zeta)$ se naziva **greškom diskretizacije** ili **odsijecanja** (*truncation error*). Ona se može ocijeniti na slijedeći način [1]

$$|e_d(a;h)| \leq \frac{M}{2} h^1, \quad (12)$$

gdje je $M = \max|f''(x)|$, $x \in D(f)$. M ne ovisi ni o h ni o a . Kao što je vidljivo iz (11) formula za aproksimaciju derivacije konačnim razlikama unaprijed (3) aproksimira derivaciju s točnošću prvog reda. **Ukupnu grešku** ovakve aproksimacije $e_f(a;h)$ činiti će zajedno greška zaokruživanja $e_z(h)$ i greška diskretizacije $e_d(a;h)$. Greške zaokruživanja možemo zapisati kao δ_1 i δ_2 i uzimajući ih obzir slijedi

$$f'(a) = \frac{[f_z(a+h) + \delta_1] - [f_z(a) + \delta_2]}{h} - \frac{h}{2} f''(\zeta), \quad (13)$$

gdje su $f_z(a)$ i $f_z(a+h)$ brojevi koji nastaju zaokruživanjem brojeva $f(a)$ i $f(a+h)$. Izolacijom članova δ_1 i δ_2 dolazi se do izraza koji u sebi sadrži već ranije spomenutu aproksimaciju konačnim razlikama unaprijed (3) te dva člana koji predstavljaju greške aproksimacije. Zato je

$$f'(a) = \frac{f_z(a+h) - f_z(a)}{h} + \frac{\delta_1 - \delta_2}{h} - \frac{h}{2} f''(\zeta). \quad (14)$$

Prvi od ta dva člana je greška zaokruživanja, a drugi je greška diskretizacije, koji zajedno čine ukupnu grešku aproksimacije $e_t(a;h)$. Stoga vrijedi

$$f'(a) = \frac{f_z(a+h) - f_z(a)}{h} + e_z(h) + e_d(a;h) = \frac{f_z(a+h) - f_z(a)}{h} + e_t(a;h). \quad (15)$$

Iz (14) se vidi da pri odabiru premalenog koraka h greška zaokruživanja dominira nad greškom diskretizacije. I ovdje se vidi kako je dobar odabir koraka h vrlo važan i kako o njemu bitno ovisi točnost ovakvih izraza za numeričko deriviranje, budući da i greške zaokruživanja i greške diskretizacije direktno ovise o h (15). U nastavku će se pozornost obratiti samo na greške diskretizacije kod različitih metoda numeričkog deriviranja.

Na sličan način kao kod (8), za deriviranje unazad može se pisati

$$f(a-h) = f(a) - h \cdot f'(a) + h^2 \cdot \frac{f''(a)}{2} + \dots + (-h)^n \cdot \frac{f^{(n)}(a)}{n!} + \dots \quad (16)$$

Iz toga slijedi

$$f'(a) = \frac{f(a) - f(a-h)}{h} + \frac{h}{2} f''(a) - \dots - \frac{(-h)^{n-1}}{n!} f^{(n)}(a) - \dots \quad (17)$$

Članove višeg reda i ovom slučaju može se smatrati greškom prvog reda $O(h)$ za numeričko deriviranje unazad. Analogno (11) također vrijedi

$$f'(a) = \frac{f(a) - f(a-h)}{h} + \frac{h}{2} f''(\zeta), \quad (18)$$

gdje je $a-h < \zeta < a$. To znači da je greška $h/2f''(\zeta)$ aproksimacije (4) prvog reda. Oduzimanjem (16) od (8) dobiva se

$$\begin{aligned}
 f(a+h) - f(a-h) &= \\
 &= 2 \cdot h \cdot f'(a) + 2 \cdot h^3 \cdot \frac{f'''(a)}{6} + \dots + h^n \cdot \frac{f^{(n)}(a)}{n!} - (-h)^n \cdot \frac{f^{(n)}(a)}{n!} + \dots
 \end{aligned}$$

Daljnijm sređivanjem dolazi se slijedećeg izraza koji u sebi sadrži formulu za aproksimaciju derivacije centralnim konačnim razlikama

$$f'(a) = \frac{f(a+h) - f(a-h)}{2h} - \frac{h^2}{6} f'''(a) - \dots - \frac{h^{n-1}}{2 \cdot n!} f^{(n)}(a) - \frac{(-h)^{n-1}}{2 \cdot n!} f^{(n)}(a) + \dots \quad (19)$$

Članovi višeg reda u ovom slučaju predstavljaju grešku drugog reda $O(h^2)$ za aproksimaciju derivacije centralnim konačnim razlikama. Također se (19) može zamijeniti slijedećim

$$f'(a) = \frac{f(a+h) - f(a-h)}{2h} - \frac{h^2}{6} f'''(\zeta). \quad (20)$$

Iz ovog se izraza vidi kako formula za aproksimaciju derivacije centralnim konačnim razlikama (20) ima viši red točnosti (točnost drugog reda) od formula sa konačnim razlikama unaprijed (11) i unazad (18) (točnost prvog reda). Naime, prilikom oduzimanja izraza (8) i (16) u izvodu za (20) poništavaju se članovi uz h^2 , a ostaju članovi uz h^3 , pa nakon dijeljenja sa $2h$ greška postaje drugog reda ($O(h^2)$). Dakle, kod formula za aproksimaciju derivacije centralnim konačnim razlikama greška mnogo brže opada nego što je to slučaj za formule sa konačnim razlikama unaprijed i unazad. To je razlog zašto numeričkom deriviranju centralnim konačnim razlikama treba dati prednost ispred ostala dva postupka gdje god je to moguće [1]. Međutim, u praksi se može često pojaviti da dostupne funkcijske vrijednosti nisu ekvidistantno raspoređene po apscisi, pa je $h_1 \neq h_2$, gdje su h_1 i h_2 udaljenosti desno i lijevo od točke s apscisom $x = a$. Tada se funkcije $f(a+h_1)$ i $f(a-h_2)$ mogu, pomoću razvoja u Taylorov red, pisati na slijedeći način

$$f(a+h_1) = f(a) + h_1 \cdot f'(a) + h_1^2 \frac{f''(\zeta_1)}{2} \quad (21)$$

$$f(a-h_2) = f(a) - h_2 \cdot f'(a) + (-h_2)^2 \cdot \frac{f''(\zeta_2)}{2}, \quad (22)$$

gdje je $a < \zeta_1 < a+h_1$ i $a-h_2 < \zeta_2 < a$.

Oduzimanjem (22) od (21) se dobiva

$$f(a+h_1) - f(a-h_2) = (h_1+h_2) \cdot f'(a) + \frac{h_1^2}{2} f''(\zeta_1) - \frac{h_2^2}{2} f''(\zeta_2).$$

Dalje slijedi

$$f'(a) = \frac{f(a+h_1) - f(a-h_2)}{h_1+h_2} - \frac{h_1^2}{2(h_1+h_2)} \cdot f''(\zeta_1) + \frac{h_2^2}{2(h_1+h_2)} \cdot f''(\zeta_2),$$

$$f'(a) = \frac{f(a+h_1) - f(a-h_2)}{h_1+h_2} + \frac{h_2^2 \cdot f''(\zeta_2) - h_1^2 \cdot f''(\zeta_1)}{2(h_1+h_2)},$$

gdje prvi dio predstavlja aproksimaciju derivacije, a drugi dio grešku aproksimacije derivacije. Ako se u drugom dijelu uvede supstitucija $h_2 = c \cdot h_1$, gdje je $c > 0$ i $c \neq 1$, konačno se dolazi do izraza

$$f'(a) = \frac{f(a+h_1) - f(a-h_2)}{h_1+h_2} + h_1 \cdot \frac{c^2 \cdot f''(\zeta_2) - f''(\zeta_1)}{2(1+c)}. \quad (23)$$

Još treba pokazati da je greška numeričke derivacije u izrazu (23) prvog reda. To se može provjeriti pomoću slijedećeg izraza

$$\begin{aligned} \lim_{h_1 \rightarrow 0} \frac{h_1 \cdot \frac{c^2 \cdot f''(\zeta_2) - f''(\zeta_1)}{2(1+c)}}{h_1} &= \lim_{h_1 \rightarrow 0} \frac{c^2 \cdot f''(\zeta_2) - f''(\zeta_1)}{2(1+c)} = \frac{c^2 \cdot f''(a) - f''(a)}{2(1+c)} = \\ &= \frac{(c^2 - 1) \cdot f''(a)}{2(1+c)} = \frac{c-1}{2} \cdot f''(a), \end{aligned}$$

čime se dobiva konstantu različitu od nule, osim u slučaju kada je $f''(a) = 0$. To znači da je greška numeričke derivacije prvog reda ($O(h_1)$). Može se konstatirati kako se kod različitih međusobnih razmaka točaka točnost aproksimacije derivacije smanjuje, budući da se ona u ovom slučaju u odnosu na (20) smanjila s drugog na prvi red točnosti. Dakle, bolje je ukoliko su funkcijske vrijednosti iz kojih se računa aproksimacija derivacije ekvidistantno raspoređene po apscisi [1]. To naročito dolazi do izražaja kada se derivacije računaju sa funkcijskim vrijednostima u više točaka, o čemu će biti riječi u nastavku.

2.4. Računanje druge derivacije numeričkim deriviranjem

Zbrajanjem izraza (8) i (16) i sređivanjem dolazi se do izraza

$$f(a+h) + f(a-h) = 2f(a) + h^2 f''(a) + \frac{h^4}{12} f^{IV}(a) + \dots$$

i slijedi

$$f''(a) = \frac{f(a+h) - 2f(a) + f(a-h)}{h^2} + \frac{h^2}{12} f^{IV}(a) + \dots \quad (24)$$

Iz (24) se dobiva izraz za aproksimaciju druge derivacije centralnim konačnim razlikama koji je drugog reda točnosti (greška $O(h^2)$). Izraz (24) se može zamijeniti izrazom

$$f''(a) = \frac{f(a+h) - 2f(a) + f(a-h)}{h^2} + \frac{h^2}{12} f^{IV}(\zeta) \quad (25)$$

Do izraza za aproksimaciju druge derivacije konačnim razlikama unaprijed dolazi se tako da se (8) pomnoži sa 2 i oduzme od Taylorovog razvoja za funkciju $f(a+2h)$ koji je

$$f(a+2h) = f(a) + 2h \cdot f'(a) + 4h^2 \cdot \frac{f''(a)}{2} + \dots + (2h)^n \cdot \frac{f^{(n)}(a)}{n!} + \dots \quad (26)$$

Nakon sređivanja se dobije

$$f(a+2h) - 2f(a+h) = -f(a) + h^2 f''(a) + h^3 f'''(a) + \dots,$$

ili

$$f''(a) = \frac{f(a+2h) - 2f(a+h) + f(a)}{h^2} - hf'''(a) - \dots \quad (27)$$

Izraz (27) se može zamijeniti sa

$$f''(a) = \frac{f(a+2h) - 2f(a+h) + f(a)}{h^2} - hf'''(\zeta) \quad (28)$$

Kao i kod formule za aproksimaciju prve derivacije konačnim razlikama unaprijed (11), postignut je prvi red točnosti (greška $O(h)$). Bitna razlika je u tome što se za viši red derivacije trebala koristiti još jedna točka, $(a+2h, f(a+2h))$.

Analogno se dobije aproksimacija druge derivacija konačnim razlikama unazad. Zato se koristi Taylorov red za razvoj funkcija $f(a-2h)$. Vrijedi

$$f(a-2h) = f(a) - 2h \cdot f'(a) + 4h^2 \cdot \frac{f''(a)}{2} + \dots + (-2h)^n \cdot \frac{f^{(n)}(a)}{n!} + \dots \quad (29)$$

Od ovog izraza se oduzima (16) pomnožen sa 2. Nakon sređivanja se dobije

$$f(a-2h) - 2f(a-h) = -f(a) + h^2 f''(a) - h^3 f'''(a) + \dots,$$

tj.

$$f''(a) = \frac{f(a) - 2f(a-h) + f(a-2h)}{h^2} + hf'''(a) - \dots \quad (30)$$

Kod izraza (30) za aproksimaciju druge derivacija konačnim razlikama unazad postignuta je točnost prvog reda (greška $O(h)$). Analogno, umjesto (30) može se staviti

$$f''(a) = \frac{f(a) - 2f(a-h) + f(a-2h)}{h^2} + hf'''(\zeta) \quad (31)$$

I ovdje je za računanje druge derivacije bila potrebna dodatna treća točka, $(a-2h, f(a-2h))$. Bitno je primijetiti kako se, za pojedinu metodu numeričke derivacije, greška kod derivacija višeg reda ne povećava, odnosno, red točnosti ostaje nepromijenjen. Međutim, korištenjem više točaka u formulama za numeričko deriviranje moguće je postići viši red točnosti [2]. To je vidljivo iz usporedbe formula za aproksimaciju prve derivacije konačnim razlikama unaprijed i unazad, koje koriste po dvije točke, sa formulom sa centralnim konačnim razlikama koja koristi tri točke i postiže viši red točnosti.

2.5. Formule za numeričko deriviranje višeg reda točnosti

Formula za aproksimaciju derivacije konačnim razlikama unaprijed i unazad može se također izvesti sa tri točke. Izraz (8) pomnoži se sa 4 i od njega se oduzima (26), čime se dobiva

$$4f(a+h) - f(a+2h) = 3f(a) + 2hf'(a) - \frac{2h^3}{3} f'''(a) + \dots$$

Sređivanjem se dobije izraz

$$f'(a) = \frac{-f(a+2h) + 4f(a+h) - 3f(a)}{2h} + \frac{h^2}{3} f'''(\zeta), \quad (32)$$

gdje je prvi član desne strane aproksimacija derivacije konačnim razlikama unaprijed, a drugi član je greška očito drugog reda ($O(h^2)$). Na sličan način, oduzimanjem (16) pomnoženog sa 4 od (29) se dobije:

$$f(a-2h) - 4f(a-h) = -3f(a) + 2hf'(a) - \frac{2h^3}{3} f'''(a) + \dots$$

Nakon sređivanja vidljivo je da je dobivena formula za aproksimaciju derivacije konačnim razlikama unazad pomoću tri točke uz pripadajuću grešku drugog reda ($O(h^2)$). Također imamo

$$f'(a) = \frac{3f(a) - 4f(a-h) + f(a-2h)}{2h} + \frac{h^2}{3} f'''(\zeta). \quad (33)$$

Vidi se da su sada formule za aproksimaciju derivacije unaprijed (32) i unazad (33) postigle točnost drugog reda, za razliku od (11) i (18) koji koriste dvije točke i postižu točnost prvog reda. Točnost se može još povećati dodavanjem novih točaka u formule za aproksimaciju derivacije. Ovdje će se izvesti formule za numeričko deriviranje konačnim razlikama unaprijed i unazad koristeći četiri točke, te formula za numeričko deriviranje centralnim konačnim razlikama koja koristi pet točaka. Ako se Taylorov razvoj funkcije $f(a+h)$ (8) pomnoži sa 6 i od njeга oduzme (26) i (16) pomnožen sa 2 iščezavaju članovi uz $f''(a)$ i $f'''(a)$, pa ostaje

$$6f(a+h) - f(a+2h) - 2f(a-h) = 3f(a) + 6hf'(a) - \frac{h^4}{2} f^{IV}(a) + \dots$$

Koristeći četiri točke dolazi se do izraza:

$$f'(a) = \frac{-f(a+2h) + 6f(a+h) - 3f(a) - 2f(a-h)}{6h} + \frac{h^3}{12} f^{IV}(\zeta), \quad (34)$$

koji daje aproksimaciju derivacije konačnim razlikama unaprijed i grešku trećeg reda $O(h^3)$. Da bi se došlo do analognog izraza za numeričko deriviranje konačnim razlikama unazad treba od (29) oduzeti (16) pomnožen sa 6 i tome još pridodati (8) pomnožen sa 2. Na taj način ponovno iščezavaju članovi uz $f''(a)$ i $f'''(a)$, pa ostaje

$$f(a-2h) - 6f(a-h) + 2f(a+h) = -3f(a) + 6hf'(a) + \frac{h^4}{2} f^{IV}(a) + \dots$$

Slično (34) sada vrijedi

$$f'(a) = \frac{2f(a+h) + 3f(a) - 6f(a-h) + f(a-2h)}{6h} - \frac{h^3}{12} f^{IV}(\zeta), \quad (35)$$

što daje aproksimaciju derivacije konačnim razlikama unazad pomoću četiri točke koja je trećeg reda točnosti (greška $O(h^3)$) [1]. Ako se pak iskoristi pet točaka (središnju i po dvije sa svake strane) dolazi se do formule za aproksimaciju derivacije centralnim konačnim razlikama. Najprije treba od (29) oduzeti (26) i (16) pomnožen sa 8 i tome još pridodati (8) također pomnožen sa 8. Zbrajanjem i oduzimanjem tako izmnoženih izraza iščezavaju članovi uz $f(a)$, $f''(a)$, $f'''(a)$ i $f^V(a)$, a ostaje samo

$$f(a-2h) - 8f(a-h) + 8f(a+h) - f(a+2h) = 12hf'(a) - \frac{2}{5}h^5 f^V(a) + \dots$$

Oдавde se lako dobije formula za aproksimacije derivacije centralnim konačnim razlikama koristeći pet točaka koja postiže točnost četvrtog reda (greška $O(h^4)$). Vrijedi

$$f'(a) = \frac{f(a-2h) - 8f(a-h) + 8f(a+h) - f(a+2h)}{12h} + \frac{h^4}{30} f^V(\zeta) \quad (36)$$

Očito je kako ovisno o broju odabranih točaka (i) formule za aproksimaciju derivacije postižu red točnosti $n = i - 1$, neovisno o redu derivacije. Kako se u formulama za aproksimaciju derivacija uzima više točaka, tako sve više dolazi do izražaja prednost odabira ekvidistantnih (po apscisi) točaka u odnosu na neke druge rasporede točaka. Naime, prilikom izvođenja (34), (35) i (36), ovisno o metodi numeričke derivacije, u izrazima iščezavaju članovi sa $f''(a)$, $f'''(a)$, $f^V(a)$ itd. čime se povećava red točnosti. Kod točaka koje nisu ekvidistantno raspoređene iščezavanje takvih članova u izrazima nije moguće i oni zadržavaju prvi red točnosti bez obzira na broj točaka koji se uvodi u izraze. Pogotovo je nepovoljna situacija u kojoj se međusobni razmaci točaka bitno razlikuju. Puno bolje rješenje, u slučaju proizvoljno raspoređenih točaka po apscisi, se može dobiti ukoliko se kroz te točke “provuče” neki interpolacijski polinom, pa se onda njega analitički derivira [4]. Takvo je rješenje, naravno, prihvatljivo i za ekvidistantno raspoređene točke po apscisi. Prednost interpolacijskog polinoma ispred numeričke derivacije leži u tome što greške zbog netočno izmjerenih funkcijskih vrijednosti u određenim točkama dodatno povećavaju grešku numeričke derivacije [2].

3. Numerički eksperiment

3.1. Opis numeričkog eksperimenta

Praktični dio rada napravljen je u računalnom sustavu *Mathematica*, gdje se na dvije funkcije različitog tipa pravi analiza triju osnovnih metoda numeričkog deriviranja. Te funkcije su:

$$\text{a) } f(x) = \sin(0.5\sqrt{x})$$

$$\text{b) } f(x) = 3x^4 - 7x^3 - 12x - 3$$

Najprije je bilo potrebno napraviti module za numeričko deriviranje konačnim razlikama unaprijed, unazad i centralnim konačnim razlikama (slično kao u [3]), pa rezultate dobivene tim trima metodama za zadanu funkciju usporediti sa točnim (analitičkim) rješenjima za prvu derivaciju funkcije. Moduli su napravljeni na način da se odabere točka s apscisom $x = a$ i razmak susjednih točaka h ($h > 0$), pa se, ovisno o metodi numeričke derivacije, računa aproksimirana vrijednost derivacije u odabranoj točki s apscisom a te relativna pogreška numeričke derivacije u odnosu na točnu vrijednost dobivenu analitičkim deriviranjem. Nakon toga, korak h se prepolavlja (podijeli sa 2) i ponovno se računaju aproksimirane vrijednosti derivacije trima metodama numeričke derivacije uz pripadajuće relativne pogreške. Takav postupak se ponavlja ukupno n puta tako da je korak h u svakom slijedećem prolazu dvostruko manji. Vrijednosti koje se dobiju opisanim postupkom dane su tablično i grafički, a detaljnije su objašnjene u slijedećem odlomku. Na kraju, za tri odabrane vrijednosti koraka h dani su dijagrami na kojima je ucrtan određen broj diskretnih točaka $(x, f'(x))$ za tri navedene metode numeričke derivacije i krivulja $f'(x)$ čija je funkcija dobivena analitičkim deriviranjem funkcije $f(x)$. Ti će dijagrami poslužiti za usporedbu i ocjenu navedenih metoda numeričke derivacije.

3.2. Rezultati numeričkog eksperimenta

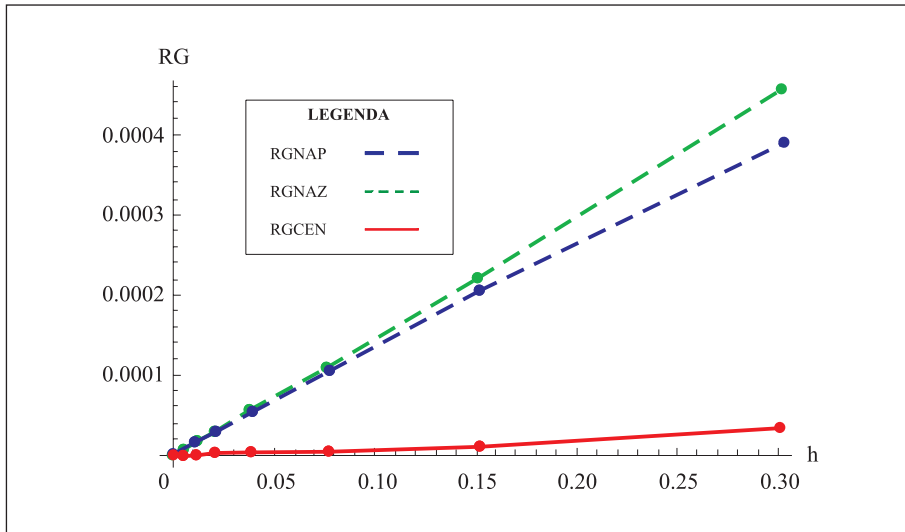
$$\text{a) } f(x) = \sin(0.5\sqrt{x})$$

Kao što je rečeno u prethodnom odlomku, ono što je prvo promatrano bila je veličina (relativne) pogreške, odnosno ovisnost točnosti aproksimacije derivacije numeričkim metodama o veličini koraka h . Odabrana je točka $a=30$, a početna vrijednost koraka bila je $h = 0,3$ i ta se vrijednost 19 puta prepolavljala. Točna vrijednost derivacije u odabranoj točki iznosi $f'(30) = -0.0419873$. Rezultati izračuna aproksimiranih derivacija u točki $a = 30$ trima numeričkim metodama i pripadajuće relativne greške za različite vrijednosti koraka h najprije su predstavljene tablično. Oznake ANAP, ANAZ i ACEN odnose na aproksimirane vrijednosti derivacije izračunate u točki $a = 30$ metodama numeričke derivacije konačnim razlikama unaprijed, unazad i centralnim konačnim razlikama respektivno, a oznake RGNAP, RGNAZ i RGCEN se odnose na pripadajuće relativne pogreške.

Tablica 1. Ovisnost točnosti metoda numeričke derivacije konačnim razlikama unaprijed, unazad i centralnim konačnim razlikama o veličini koraka h

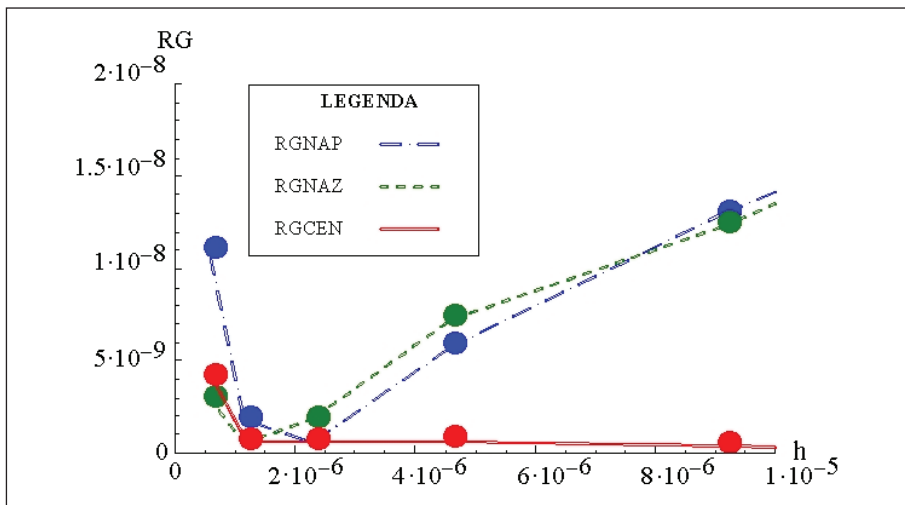
h	ANAP	RGNAP	ANAZ	RGNAZ	ACEN	RGCEN
0,3	-0,042	0,000386	-0,04197	0,000452	-0,04199	3,33E-05
0,15	-0,042	0,000201	-0,04198	0,000218	-0,04199	8,34E-06
0,075	-0,04199	0,000103	-0,04198	0,000107	-0,04199	2,08E-06
0,0375	-0,04199	5,18E-05	-0,04199	5,29E-05	-0,04199	5,21E-07
0,01875	-0,04199	2,6E-05	-0,04199	2,63E-05	-0,04199	1,3E-07
0,009375	-0,04199	1,31E-05	-0,04199	1,31E-05	-0,04199	3,26E-08
0,004688	-0,04199	6,53E-06	-0,04199	6,55E-06	-0,04199	8,14E-09
0,002344	-0,04199	3,27E-06	-0,04199	3,27E-06	-0,04199	2,03E-09
0,001172	-0,04199	1,64E-06	-0,04199	1,64E-06	-0,04199	5,08E-10
0,000586	-0,04199	8,18E-07	-0,04199	8,18E-07	-0,04199	1,28E-10
0,000293	-0,04199	4,09E-07	-0,04199	4,09E-07	-0,04199	3E-11
0,000146	-0,04199	2,04E-07	-0,04199	2,04E-07	-0,04199	6,39E-13
7,32E-05	-0,04199	1,02E-07	-0,04199	1,02E-07	-0,04199	1,87E-11
3,66E-05	-0,04199	5,11E-08	-0,04199	5,13E-08	-0,04199	9,09E-11
1,83E-05	-0,04199	2,55E-08	-0,04199	2,54E-08	-0,04199	3,55E-11
9,16E-06	-0,04199	1,3E-08	-0,04199	1,23E-08	-0,04199	3,24E-10
4,58E-06	-0,04199	5,74E-09	-0,04199	7,26E-09	-0,04199	7,59E-10
2,29E-06	-0,04199	5,41E-10	-0,04199	1,77E-09	-0,04199	6,14E-10
1,14E-06	-0,04199	1,77E-09	-0,04199	5,41E-10	-0,04199	6,14E-10
5,72E-07	-0,04199	1,09E-08	-0,04199	2,92E-09	-0,04199	4,01E-09

Iz tablice 1. jasno se vidi kako se točnost numeričke derivacije smanjenjem koraka povećava, ali samo do neke granice, nakon čega greška ponovno raste. Dakle, za određenu veličinu koraka h postiže se najbolja točnost numeričke derivacije i te su vrijednosti u tablici posebno naznačene. Može se uočiti kako numerička derivacija konačnim razlikama unaprijed i unazad postižu istu točnost za približno istu vrijednost koraka, dok numerička derivacija centralnim konačnim razlikama znatno brže konvergira točnom rješenju i još za veće vrijednosti koraka h postiže znatno bolju točnost. Ovisnost relativne pogreške pojedine metode numeričke derivacije ovisno o veličini koraka h dana je i grafički:



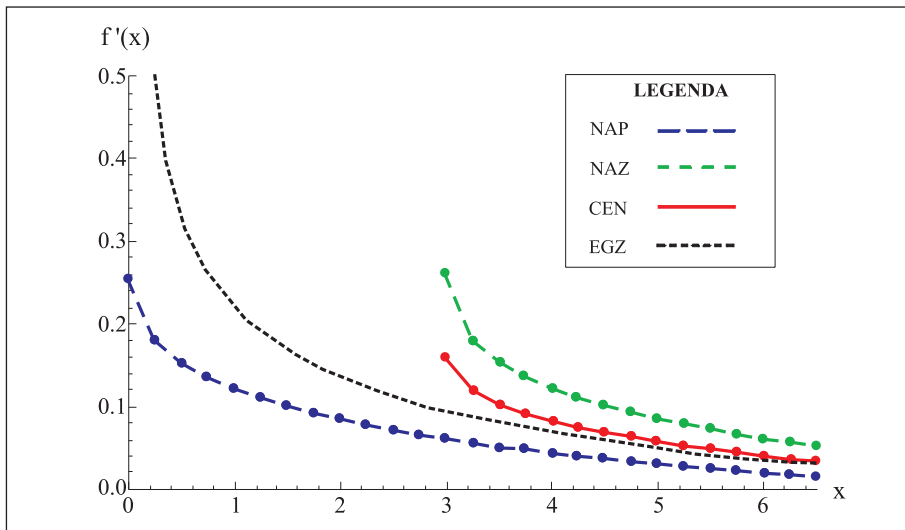
Slika 3. Dijagram ovisnosti relativne pogreške pojedine metode numeričke derivacije ovisno o veličini koraka h

Sa slike 3. vidljivo je kako već za početnu vrijednost koraka $h=0.3$ numerička derivacija centralnim konačnim razlikama daje znatno manju pogrešku od ostale dvije metode i kasnije brže konvergira točnijem rješenju. Detalj najmanje relativne pogreške dan je na slijedećoj slici.

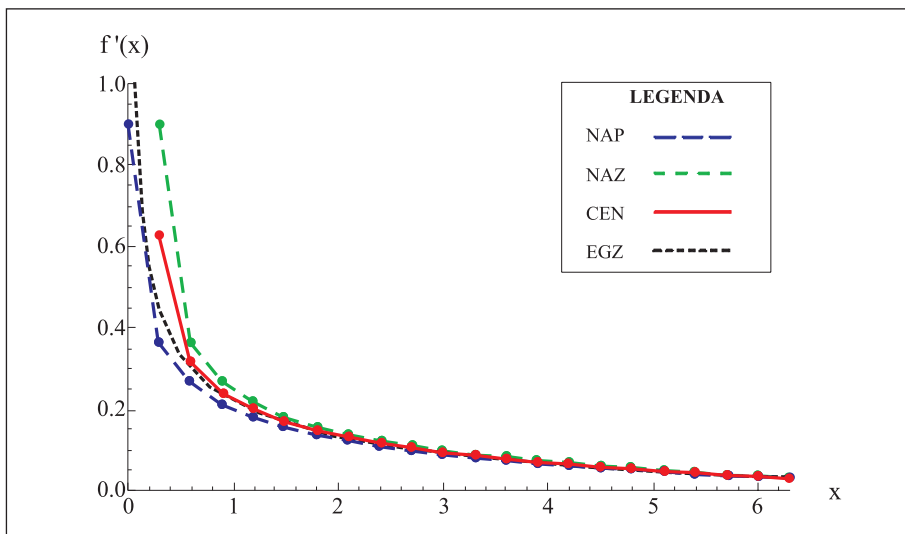


Slika 4. Detalj rasta relativne pogreške pri prevelikom smanjenju koraka h prikazan na dijagramu ovisnosti relativne pogreške pojedine metode numeričke derivacije ovisno o veličini koraka h

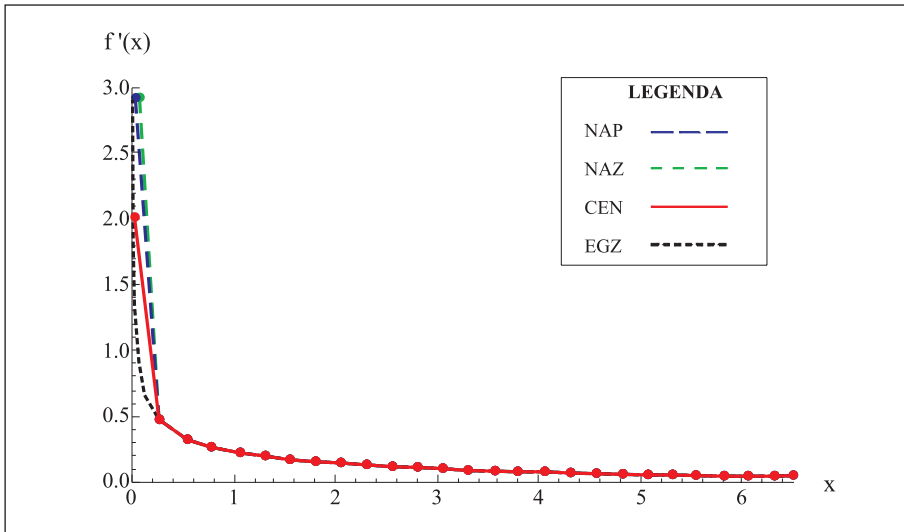
Na slici 4. može se uočiti vrlo nagli porast relativne pogreške svih triju metoda numeričke derivacije oko vrijednosti koraka $h = 1 \cdot 10^{-6}$. Vidi se, isto tako, da relativna pogreška numeričke derivacije centralnim konačnim razlikama već znatno prije počinje polagano rasti. Kao što je već rečeno u teorijskom dijelu rada, najtočniju aproksimaciju numeričkim deriviranjem dobivamo kada korak $h \rightarrow 0$, a uzrok ovakvom povećanju pogreške pri određenoj veličini koraka h leži u grešci zaokruživanja. Naime, računalni program *Mathematica* računa sa automatskom preciznošću i ograničenim brojem decimala što u ovom slučaju uzrokuje greške zaokruživanja, iako se preciznost može podešavati i od strane korisnika. Na posljertku, dani su dijagrami koji pokazuju koliko dobro pojedina metoda numeričkog deriviranja aproksimira analitičko deriviranje ovisno o veličini koraka h . Vrijednosti aproksimacije derivacije pojedinom metodom numeričke derivacije dane su u diskretnim točkama koje su spojene pravicima (NAP – numerička derivacija konačnim razlikama unaprijed, NAZ – numerička derivacija konačnim razlikama unazad, CEN – numerička derivacija centralnim konačnim razlikama), a analitička funkcija $f'(x)$ prikazana je krivuljom (EGZ). Na slikama 5., 6. i 7. vidi se kako se smanjenjem koraka h , aproksimirane vrijednosti derivacije sve više približavaju egzaktnim vrijednostima dobivenim analitičkim izrazom za derivaciju $f'(x)$. Također, bitno je uočiti kod NAZ i CEN metoda nije moguće odrediti numeričke derivacije u slučaju kada je $h > a$, jer funkcijsku vrijednost, $f(a-h) = \sin(0.5\sqrt{a-h})$, u tom slučaju nije moguće odrediti, budući da je domena funkcije interval $[0, \infty)$. Taj je problem izraženiji što je korak h veći (vidi Sliku 5), a kod NAP metode ga nema iz razloga što se tamo korak uvijek dodaje unaprijed, odnosno pribraja.



Slika 5. Usporedba triju metoda numeričke derivacije sa analitičkom derivacijom na dijagramu $x - f'(x)$ za $x \in (0, 2\pi)$ i veličinu koraka $h=3$



Slika 6. Usporedba triju metoda numeričke derivacije sa analitičkom derivacijom na dijagramu $x - f'(x)$ za $x \in (0, 2\pi)$ i veličinu koraka $h=0.3$



Slika 7. Usporedba triju metoda numeričke derivacije sa analitičkom derivacijom na dijagramu $x - f'(x)$ za $x \in \langle 0, 2\pi \rangle$ i veličinu koraka $h=0.03$

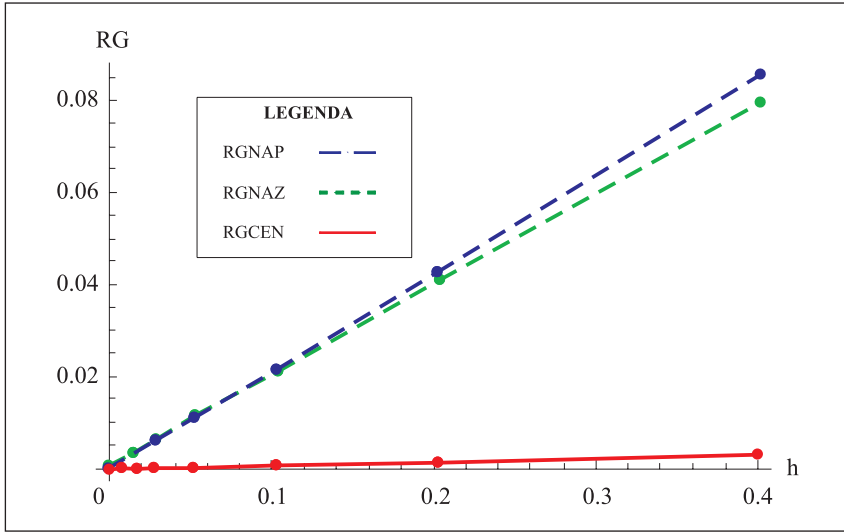
b) $f(x) = 3x^4 - 7x^3 - 12x - 3$

Za numeričko deriviranje konačnim razlikama unaprijed, unazad i centralnim konačnim razlikama odabrana je točka $a = 8$, a početna vrijednost koraka bila je $h = 0.4$ i ta se vrijednost 19 puta prepolavljala. Točna vrijednost derivacije u odabranoj točki iznosi $f'(8) = 4788$. Rezultati izračuna aproksimiranih derivacija u točki $a = 8$ trima numeričkim metodama i pripadajuće relativne greške za različite vrijednosti koraka h najprije su predstavljene tablično. Iz tablice 2. može se uočiti najbolja veličina koraka h za numeričko deriviranje centralnim konačnim razlikama za odabranu točku $a = 8$, dok za preostale dvije metode maksimalna točnost nije postignuta ni nakon što se vrijednost koraka h 19 puta prepolovila. Ovdje ponovno dolazi do izražaja prednost metode numeričke derivacije koja koristi centralne konačne razlike pred metodama koje koriste konačne razlike unaprijed i unazad. Na slici 8. se vidi kako za iste (a pogotovo veće) vrijednosti koraka h metoda numeričke derivacije centralnim konačnim razlikama puno bolje aproksimira točnu vrijednost derivacije u nekoj točki u odnosu na ostale dvije metode, a smanjivanjem koraka brže konvergira točnom rješenju. Na koncu su dani dijagrami koji pokazuju koliko dobro pojedina metoda numeričkog deriviranja aproksimira analitičko deriviranje ovisno o veličini koraka h . Vrijednosti aproksimacije derivacije pojedinom metodom numeričke derivacije dane su u diskretnim točkama koje su spojene pravcima, a analitička funkcija $f'(x)$ prikazana je krivuljom. Na slikama 9., 10. i 11. vidi se kako se smanjenjem

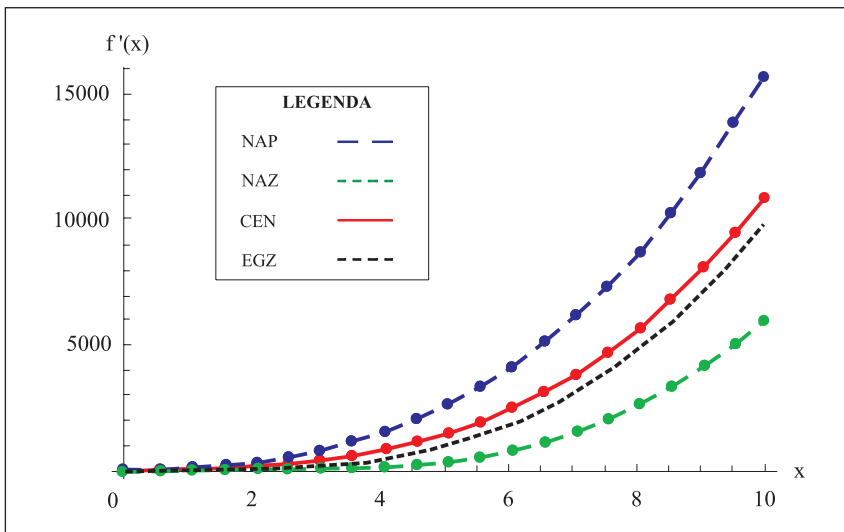
koraka h , aproksimirane vrijednosti derivacije sve više približavaju egzaktnim vrijednostima dobivenim analitičkim izrazom za derivaciju $f'(x)$.

Tablica 2. Ovisnost točnosti metoda numeričke derivacije konačnim razlikama unaprijed, unazad i centralnim konačnim razlikama o veličini koraka h

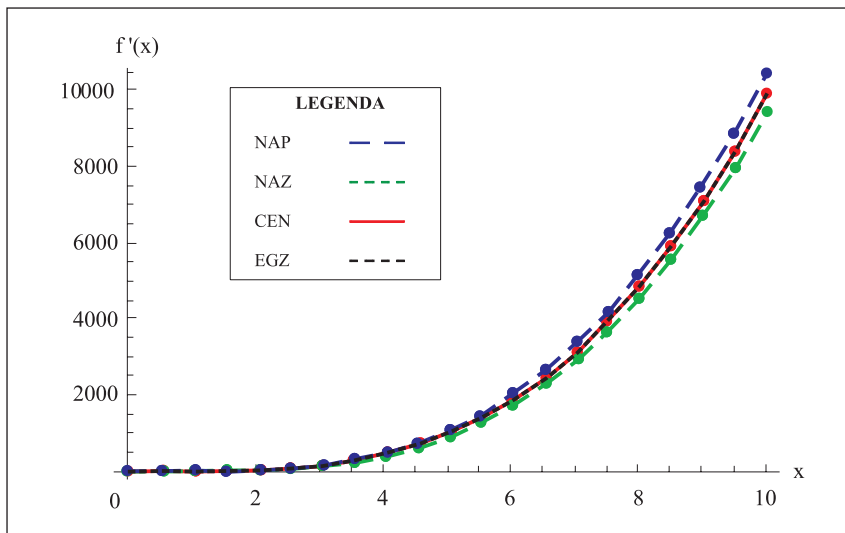
h	ANAP	RGNAP	ANAZ	RGNAZ	ACEN	RGCEN
0,4	5196,032	0,08522	4408,448	0,079272	4802,24	0,002974
0,2	4988,384	0,041851	4594,736	0,040364	4791,56	0,000744
0,1	4887,293	0,020738	4690,487	0,020366	4788,89	0,000186
0,05	4837,423	0,010322	4739,022	0,010229	4788,223	4,65E-05
0,025	4812,656	0,005149	4763,456	0,005126	4788,056	1,16E-05
0,0125	4800,314	0,002572	4775,714	0,002566	4788,014	2,9E-06
0,00625	4794,153	0,001285	4781,853	0,001284	4788,003	7,26E-07
0,003125	4791,076	0,000642	4784,926	0,000642	4788,001	1,82E-07
0,001563	4789,538	0,000321	4786,463	0,000321	4788	4,54E-08
0,000781	4788,769	0,000161	4787,231	0,000161	4788	1,13E-08
0,000391	4788,384	8,03E-05	4787,616	8,03E-05	4788	2,83E-09
0,000195	4788,192	4,01E-05	4787,808	4,01E-05	4788	7,12E-10
9,77E-05	4788,096	2,01E-05	4787,904	2,01E-05	4788	1,86E-10
4,88E-05	4788,048	1E-05	4787,952	1E-05	4788	4,05E-11
2,44E-05	4788,024	5,02E-06	4787,976	5,02E-06	4788	6,22E-12
1,22E-05	4788,012	2,51E-06	4787,988	2,51E-06	4788	2,49E-11
6,1E-06	4788,006	1,25E-06	4787,994	1,25E-06	4788	1,18E-10
3,05E-06	4788,003	6,27E-07	4787,997	6,27E-07	4788	9,96E-11
1,53E-06	4788,001	3,13E-07	4787,998	3,14E-07	4788	3,49E-10
7,63E-07	4788,001	1,58E-07	4787,999	1,57E-07	4788	1,49E-10



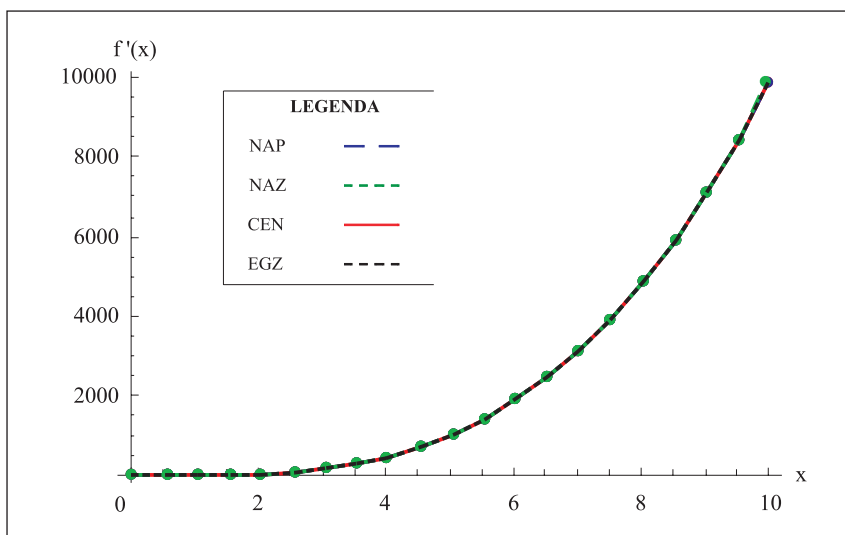
Slika 8. Dijagram ovisnosti relativne pogreške pojedine metode numeričke derivacije ovisno o veličini koraka h



Slika 9. Usporedba triju metoda numeričke derivacije sa analitičkom derivacijom na dijagramu $x - f'(x)$ za $x \in (0,10)$ i veličinu koraka $h=3$



Slika 10. Usporedba triju metoda numeričke derivacije sa analitičkom derivacijom na dijagramu $x - f'(x)$ za $x \in \langle 0, 10 \rangle$ i veličinu koraka $h=0.3$



Slika 11. Usporedba triju metoda numeričke derivacije sa analitičkom derivacijom na dijagramu $x - f'(x)$ za $x \in \langle 0, 10 \rangle$ i veličinu koraka $h=0.03$

4. Zaključak

Cilj ovog rada je objasniti osnovne principe numeričke derivacije konačnim razlikama, analizirati i usporediti pojedine metode numeričke derivacije, te istaknuti njihove prednosti i nedostatke. Potreba za korištenjem numeričke derivacije pojavljuje se ukoliko analitičko deriviranje funkcije nije pogodno za praktičnu implementaciju ili funkcija nije u cijelosti poznata, već samo funkcijske vrijednosti u diskretnim točkama. Tada se, ukoliko se u izraz za računanje derivacije (1) uvede konačno velik razmak susjednih točaka, numerički može računati vrijednost derivacije, ali samo u točkama u kojima su poznate funkcijske vrijednosti. Derivacija u nekoj točki određena numerički u pravilu predstavlja aproksimaciju točne derivacije. Prema definiciji derivacije funkcije (1) jasno je da razmak apscisa susjednih točaka $x = a$ i $x = a+h$ treba biti čim manji kako bi se dobila što točnija aproksimacija derivacije. U stvarnosti uslijed pretjeranog smanjivanjem razmaka susjednih točaka dolazi do pojave greške zaokruživanja, a ukupna (apsolutna ili relativna) greška aproksimacije počinje naglo rasti. Dakle, točnost numeričkog deriviranja je, ovisno o moći računala, ipak ograničena. S druge strane, ovisno o broju odabranih točaka i načinu njihova izbora mogu se izvesti izrazi različitog reda točnosti, a najpovoljniji je slučaj kada se oko točke u kojoj se želi izračunati derivaciju sa svake strane uzme jednak broj ekvidistantno raspoređenih točaka. Princip je slijedeći: više točaka – veća točnost. Za razliku od tog tzv. numeričkog deriviranja centralnim konačnim razlikama, nešto lošije rezultate daju metode numeričkog deriviranja konačnim razlikama unaprijed i unazad kada se susjedne točke odabiru ili lijevo ili desno od odabrane točke. Na sličan način kao što se izvode izrazi za približno računanje prve derivacije numeričkim deriviranjem mogu se izvesti i izrazi za numeričko računanje derivacija višeg reda. Alternativni pristup numeričkoj derivaciji konačnim razlikama bila bi metoda numeričke derivacije interpolacijskim polinomima, gdje se prvo kroz poznate točke provlači interpolacijski polinom, a zatim se njegova funkcija analitički derivira. Takva metoda, za razliku od numeričkog deriviranja konačnim razlikama, nije osjetljiva na proizvoljni raspored točaka po apscisi niti se povećava greška uslijed pretjeranog smanjivanja razmaka između susjednih točaka.

5. Literatura i ostali izvori

- [1] Antia, H. M., *Numerical Methods for Scientists and Engineers*, Birkhäuser Verlag, Boston–Basel–Berlin, 2002
- [2] Chapra, S., Canale, R. *Numerical Methods for Engineers*. McGraw-Hills Companies, New York, 2002.

- [3] Dražić, I., Barišić, B., Mujaković, N. The implementation of iterative outer approximation method for elasto-plastic torsion problem. *Technological engineering*. **5**: 37-39, 2008.
- [4] Drmač, Z., Hari, V., Marušić, M., Rogina, M., Singer, S., Singer, S., (2003), "Numerička analiza – Predavanja i vježbe", Prirodoslovno matematički fakultet, Zagreb, < <http://web.math.hr/nastava/unm/materijali/Hari%20-%20Numericka%20analiza%20-%20osnovni%20udzbenik.pdf>>, Pristupljeno: 13. srpnja 2009.
- [5] Hunt, H. R., Lipsman, R.L., Osborn, J. E., Outing, D. A. Rosenberg, J. M., *Differential Equations with Mathematica*. John Wiley & Sons, Hoboken, 2009.

Sanacija armiranobetonske konstrukcije lansirne stanice torpeda u Rijeci

Repair of the Torpedo Launch Pad Station Reinforced Concrete Structure in Rijeka

Nataša Grgorinić*, Davor Grandić**, Paulo Šćulac**

Sažetak. Prva torpeda na svijetu proizvedena su u Rijeci još u 19. stoljeću, a za ispitivanje pravilnosti njihove putanje, 1930-ih godina izgrađena je i postojeća lansirna stanica. Zbog izloženosti agresivnom morskom okolišu, to jest kloridima iz mora koji su uzrokovali koroziju armature i mehaničkom djelovanju valova armiranobetonska konstrukcija lansirne stanice znatno je oštećena. U radu se prikazuje ocjena postojećeg stanja armiranobetonske konstrukcije lansirne stanice torpeda u Rijeci. U ovisnosti o vrsti i veličini oštećenja armiranobetonskih elemenata predloženi su odgovarajući sanacijski postupci. Dana je procjena vrijednosti predviđenih sanacijskih radova na armiranobetonskom dijelu konstrukcije. Prikazane analize, ocjene i prijedlozi sanacije armiranobetonskog dijela konstrukcije mogu poslužiti kao preliminarne smjernice za izradu projekta sanacije, ali i kao dokument o stanju konstrukcije u vremenu provedbe aktivnosti opisanih u ovom radu s obzirom da se proces propadanja konstrukcije nastavlja.

Ključne riječi: armiranobetonska konstrukcija, oštećenja, korozija armature, morski okoliš, ocjena postojećeg stanja, sanacijski postupci

Abstract. The first torpedo in the world is created in Rijeka in the 19th century. At the end of the 1920s, the existing launch pad was built for testing the regularity of torpedo's trajectories. The reinforced concrete structure of Torpedo Launch Pad Station is significantly damaged due to mechanical action of waves and aggressive marine environment exposure, e.g. marine chlorides which induce reinforcement

* Radulović d.o.o., Šetalište XIII. divizije 45, Rijeka
E-mail: ngrgorinic@gmail.com

** Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Viktora Cara Emina 5, Rijeka
E-mail: {davor.gradic,paulo.sculac}@gradri.hr

corrosion. In this paper, the condition state assessment of the torpedo launch pad station RC-structure in Rijeka is presented. The appropriate repair procedures are proposed in dependence to the type and extent of damage in the reinforced concrete elements. A cost estimation of the repair works predicted on the RC-structure is performed. The presented analyses, assessments and suggestions for the RC-structure repair can be used as a preliminary direction for a further work on the design documentation, but also as a real condition state of the structure in the time of conducting these analyses and assessments.

Key words: RC-structure, damages, reinforcement corrosion, marine environment, condition state assessment, repair procedures

1. Uvod

Lansirne stanice u svijetu nalaze se na atraktivnim lokacijama, na obali mora ili jezera, a k tome su fascinantne i kao građevine. Nazivaju ih katedralama na moru zbog njihove monumentalnosti [1]. Većina lansirnih stanica u svijetu je zapuštena, čak i ondje gdje su zaštićene.

Iz povijesnih dokumenata i fotografija poznato je da je lansirna stanica koja ima današnji izgled izgrađena 1930-tih godina u dvije gradbene etape [2,3]. Dogradnjom zapadnog dijela volumen lansirne stanice je udvostručen. Spoj lansirne stanice iz prve etape i kasnije nedograđenog dijela i danas je vidljiv u unutrašnjosti građevine.

Lansirna stanica izgrađena je od armiranog betona, čelika drva i stakla. Na svom vrhu ima drvenu promatračnicu iz koje je praćena putanja ispitivanih torpeda (slika 1).

Prva primjena armiranog betona u Rijeci zabilježena je u zadnjim godinama 19. stoljeća [4]. U vrijeme izvedbe ove građevine armiranobetonska je gradnja u Rijeci već bila afirmirana.

U riječkoj tvornici torpeda, koja je kroz godine mijenjala vlasnike i nazive, proizvodnja torpeda traje sve do 1966. godine. U svojoj 150 godišnjoj tradiciji riječka tvornica torpeda tehnološki je obilježila grad Rijeku.

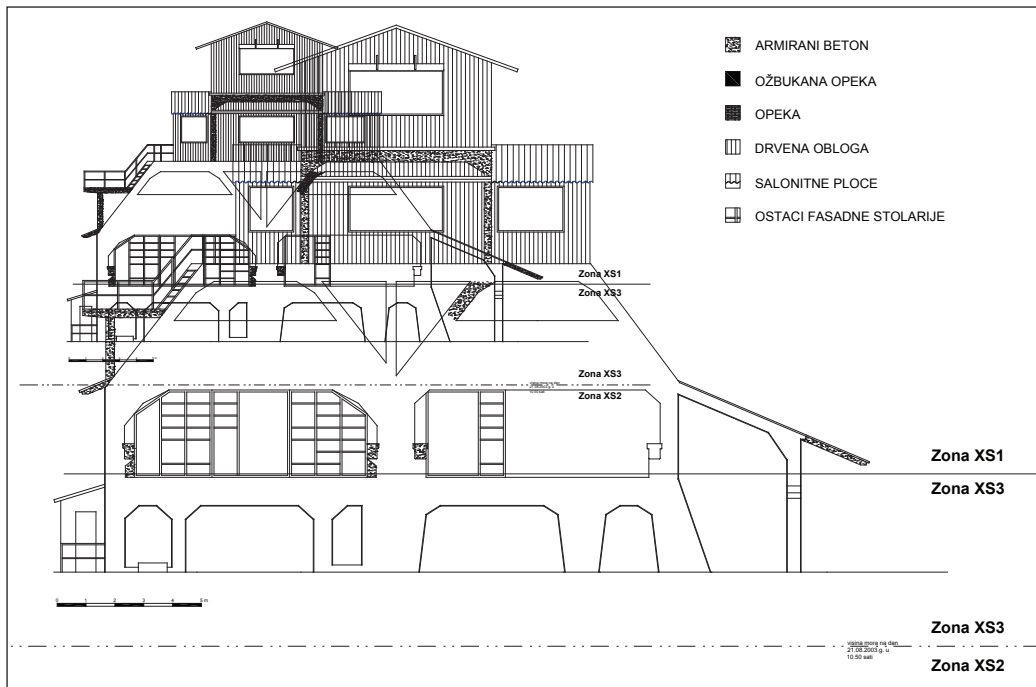


Slika 1. Fotografija lansirne stanice

2. Postojeće stanje armiranobetonskog dijela konstrukcije

2.1. Uvjeti okoliša

Konstrukcija se nalazi na približno 2,5 m iznad prosječne razine mora. Njezin donji dio (podvodni stupovi) je djelomično stalno uronjen (zona XS2 izloženosti prema HRN EN 206-1 [5]), dok se manji dio stupova nalazi u zoni plime i oseke odnosno u području zapljuskivanja (zona XS3 izloženosti prema HRN EN 206-1). Konstrukcija gleda prema jugozapadu sa morske strane i samim time je vrlo izložena na jugo. Treba još napomenuti da konstrukcija nije zaštićena nikakvim lukobranom upravo radi njene osnovne namjene testiranja torpeda, pa je samim time izložena morskim silama u njihovoj punoj snazi. Prilikom olujnog juga dolazi do zapljuskivanja cijele jugozapadne strane pa čak i drvene osmatračnice na vrhu. Ipak se za veći dio godine može reći da je zona XS3 do približno 3,3 m od prve betonske ploče konstrukcije. Iznad te kote se nalazi zona XS1 koja je izložena solima iz zraka, ali nije u izravnom dodiru s morskom vodom (osim kod velikih nevremena, 1 do 2 puta godišnje).



Slika 2. Uvjeti okoliša

2.2. Pregled postojećeg stanja po dijelovima konstrukcije

Konstrukcija je raščlanjena na dijelove prema kojima se jasnije može prikazati njeno stanje.

2.2.1. Armiranobetonski stupovi i obalni zid ispod razine radnog poda

Stupovi ispod razine radnog poda dijelom su uronjeni u more, a dijelom se nalaze neposredno iznad morske površine.

Vizualnim ronilačkim pregledom provedenim od strane studenata Građevinskog fakulteta u Rijeci utvrđeno je smanjenje betonskog presjeka stupova i armature [6]. Stupovi su obrasli morskim algama i drugim raslinjem. Neki stupovi nisu vertikalni, zbog čega se na gornje dijelove konstrukcije unose dodatne sile radi kojih dolazi do pukotina u horizontalnim gredama radnog poda. Utvrđeno je da su stupovi najvjerojatnije temeljeni na temelje samce, koji nisu vidljivi kod svih stupova, pa se može pretpostaviti vjerojatnost da su neki od njih pobijani u temeljno tlo, ili su im temeljne stope prekrivene vidljivom školjerom i nasipom. Obalni zid u cijeloj je svojoj dužini u nožici zida podlokani i oštećen do temeljnog tla. Visina oštećenja je oko 1,00 m, a dubina oštećenja i do 2,40 m.

Općenito može se reći da su stupovi u svome podmorskom dijelu bitno manje oštećeni nego u nadmorskom.

2.2.2. Armiranobetonska konstrukcija u razini radnog poda

Armiranobetonska konstrukcija u razini radnog poda je roštiljna konstrukcija koja se sastoji od sustava armiranobetonskih greda na koju se oslanja armiranobetonska podna ploča i dijelovi ranije drvene i čelične podne konstrukcije. Na znatnom dijelu ove roštiljne armiranobetonske konstrukcije uočena su oštećenja tipična za koroziju armature u betonu kao je odlamanje zaštitnog sloja betona i jaka nagriženost armature, potpuna korodiranost spona (vilica) [6]. Na sjeveroistočnom dijelu uočena su oštećenja podne ploče nastala kao posljedica djelovanja valova. Na gredama koje povezuju stupove uočljive su vertikalne pukotine kao posljedica vlačnih sila uzrokovanih otklonom temeljnih stupova od vertikalnog položaja [7].

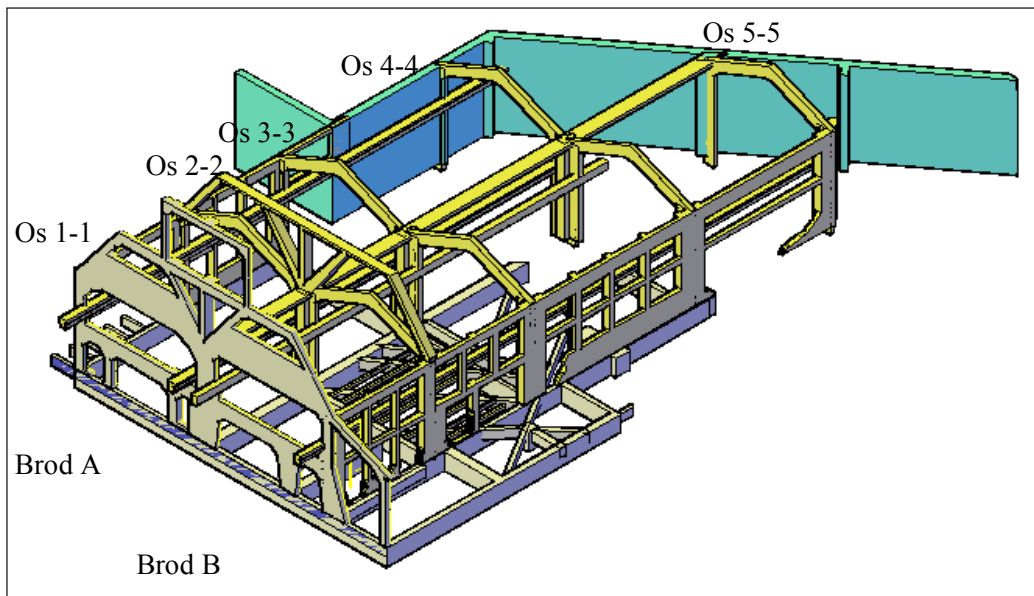
2.2.3. Armiranobetonska konstrukcija iznad razine radnog poda

Na većini armiranobetonskih elemenata uočena su oštećenja od korozije armature. Na mnogim mjestima korozija armature toliko je napredovala da je zbog bujanja produkata korozija otpao zaštitni sloj betona do armature. Uočeno jer da je na mnogim mjestima bio izveden zaštitni sloj betona premale debljine i da su neki elementi armirani većom količinom armature ugrađene na premalom međusobnom razmaku [6]. To su čimbenici, koji su zajedno s lošim svojstvima penetrabilnosti betona (mala otpornost na prodiranje klorida te velika plinopropusnost i kapilarno upijanje) pospješili nastanak uočenih oštećenja armiranobetonske konstrukcije zbog korozije armature [7].

Najveća oštećenja armiranobetonskih okvira su u osi 1-1 na oba broda te u osi 3-3 kod broda A i u osi 4-4 kod broda B (slika 3).

2.2.4. Drvena konstrukcija krova i promatračnice

Lansirna rampa je bila natkrivena betonskom i drvenom krovnom konstrukcijom, koja je na prednjem, morskom dijelu imala i betonsku i drvenu konstrukciju promatračnice povišene u odnosu na ostatak krova [6]. Glavnina krovne konstrukcije iznad radne platforme se urušila pod teretom vlastite težine i nešto jačih udara vjetrova [8]. Zbog truleži drvene građe postoji opasnost od urušavanje i preostalih krovnih visulje te drvene promatračnice.



Slika 3. Aksonometrijski prikaz armiranobetonske okvirne konstrukcije

2.3. Razredba konstrukcijskih elemenata

Provedena je razredba skupina konstrukcijskih elemenata prema vrsti i funkciji konstrukcijskog elementa, agresivnosti okoliša (razredu izloženosti) i razini oštećenja [6, 7]. Razredba je prikazana u tablicama 1 i 2.

Tablica 1. Razredba oštećenja prema CEB-u [9]

	Razine oštećenja				
	A	B	C	D	E
Promjene u boji	hrđa postoji	kao u A	kao u A	kao u A	kao u A
Pukotine	malo uzdužnih	uzdužne, malo poprečnih	opsežne, duge	kao u C	kao u C
Ljuštenje	-	malo	intenzivno	armatura gubi vezu s betonom	kao u D
Smanjenje presjeka armature	-	- 5%	- 10%	- 25%	Poprečna armatura izgubila je presjek. Glavna djelomično još postoji.
Odlamanje	-	-	-	vjerojatno	Prisutno

Tablica 2. Prikaz rezultata razredbe za glavne skupine konstrukcijskih elemenata [7]

BROD A – zapadni brod			BROD B – istočni brod		
Konstrukcijski elementi	Razina oštećenja	Udio razine oštećenja	Konstrukcijski elementi	Razina oštećenja	Udio razine oštećenja
Stupovi okvira u osi 1-1	E	100%	Stupovi okvira u prvom redu	D E	25% 75%
Greda okvira u osi 1-1	D E	30% 70%	Grede okvira u prvom redu	D E	50% 50%
Stupovi okvira u osi 2-2	D E	40% 60%	Stupovi okvira u drugom redu	E	100%
Greda okvira u osi 2-2	C D	70% 30%	Greda okvira u drugom redu	C D	20% 80%
Stupovi okvira u osi 3-3	D E	30% 70%	Stupovi okvira u trećem redu	C	100%
Greda okvira u osi 3-3	C E	20% 80%	Greda okvira u trećem redu	B	100%
Stupovi okvira u osi 4-4	D E	50% 50%	Stupovi okvira u četvrtom redu	E	100%
Greda okvira u osi 4-4	D	100%	Greda okvira u četvrtom redu	E	100%
Armiranobetonska konstrukcija u razini radnog poda	D E	80% 20%	Armiranobetonska konstrukcija u razini radnog poda	D E	80% 20%
Armiranobetonski stupovi ispod razine radnog poda	A B D E	40% 20% 10% 30%	Armiranobetonski stupovi ispod razine radnog poda	A B D E	40% 20% 10% 30%
Uzdužne grede	D	100%	Uzdužne grede	D	100%

3. Zaključak o preostalim svojstvima materijala i oštećenjima armiranobetonske konstrukcije

3.1. Beton

Prema rezultatima vizualnog pregleda i laboratorijskih ispitivanja na uzorcima betona (valjcima) izvađenima iz konstrukcije lansirne stanice iznad temeljnih stupova [6] zaključujemo sljedeće:

- Agregat od kojeg je izrađen beton i način izvedbe pojedinih elemenata razlikuju se. Ustanovljeno je da je beton u armiranobetonskoj konstrukciji lansirne stanice dijelom izrađen od drobljenog agregata, a dijelom od prirodnog šljunka i pijeska.

- Tlačna čvrstoća betona vrlo se razlikuje od uzorka do uzorka, tako da se vrijednosti izmjerene pri ispitivanju kreću se od 1,09 do 39,16 N/mm². To se objašnjava različitim vremenima, materijalima i tehnologijama izvedbe te propadanjem materijala u vremenu (djelovanje soli, atmosferilija, korozije armature, mehaničko djelovanje valova i dr.).
- Vrijednosti modula elastičnosti betona utvrđen ispitivanjem također variraju u širokom, od 5942,4 do 23517,6 N/mm².
- Beton je ocijenjen lošim s obzirom na plinopropusnost (specifični koeficijent plinopropusnosti $> 10^{-16}$ m², kriterij prema [10]).
- Sadržaj klorida u betonu višestruko nadmašuje kritičnu koncentraciju za iniciranje korozije armature koja iznosi 0,4% na masu cementa. Koeficijent difuzije kloridnih iona je veći od 5×10^{-12} .

3.2. Armatura

Armatura je vrlo oštećena djelovanjem korozije. Ispitivanjem armature dobiveni su sljedeći rezultati: najmanja granica popuštanja je 255,48 MPa, a najmanja vlačna čvrstoća je 362,17 MPa.

S obzirom na rezultate vizualnog pregleda i istražnih radova na konstrukciji te utvrđene vrste i opsega oštećenja te lokaciju građevine neposredno uz more, zaključuje se da je prevladavajući mehanizam propadanja konstrukcije korozija čelične armature u betonu prouzročena kloridima iz mora.

Dubina korozije armature proračunava se prema slijedećem izrazu:

$$P_x = 0,0116 \cdot i_{corr} \cdot t, \quad (1)$$

gdje je:

P_x – dubina korozije armature u mm,

t – vrijeme u godinama proteklo od početka korozije,

i_{corr} – srednja vrijednost brzine korozije u $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, u vremenu t .

U nedostatku rezultata mjerenja korozije može se uzeti reprezentativna vrijednost prema tablici 3, prema literaturi [5].

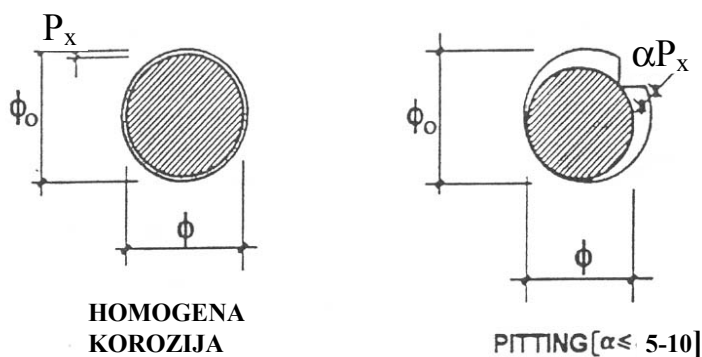
Tablica 3. Brzina korozije po razredima izloženosti prema [11]

RAZREDI IZLOŽENOSTI		i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
XS1	Vjetrom nošena morska voda	2,75
XS2	Stalno uronjeno u more	Ne očekuje se korozija osim u slučaju lošeg betona ili malog zaštitnog sloja, ipak uzeti 0,50
XS3	Područje plime i oseke te zapljuskivanja	7,00

U ovisnosti o uzroku korozije, korozija čelika za armiranje i njezin utjecaj na presjek armature vrlo je različit. Homogena korozije svjestvena je karbonatizaciji dok kloridi prouzročuju lokaliziranu koroziju poznatu kao točkasta korozija koja je uzrok znatnom smanjenju presjeka armature. Preostali promjer armature izračunava se po izrazu:

$$\phi = \phi_0 - \alpha P_x, \quad (2)$$

gdje je α koeficijent ovisan o vrsti korozije (slika 4). Kod homogene korozije α se kreće do 2, a kod lokalizirane može biti do 10.



Slika 4. Prikaz smanjenja presjeka armature kod homogene i točkaste (eng. pitting) korozije

3.2.1. Utvrđivanje dubine korozije i preostale ploštine presjeka armaturnih šipki

U Izvještaju o pregledu konstrukcije IGH d.d., PC Rijeka [8] dani su rezultati mjerenja i ispitivanja četiri uzorka armature izvađene iz konstrukcije. U izvještaju su pretpostavljani izvorni promjeri armature 22 ili 25 milimetara. Smanjenje nosivosti armature je 64 do 85%. Uzorci armature uzeti su s donje strane konstrukcije radne platforme, dakle u ekstremnim uvjetima korozije (razred izloženosti XS3).

Ako se pretpostavi da je razdoblje napredovanja korozije 78 godina, može se proračunati srednja dubina korozije armature:

$$P_x = 0,0116 \times 7 \times 78 = 6,334 \text{ mm},$$

i preostali promjer armaturnih šipki ϕ prema izrazu (2) ($\alpha = 5$) iznosi:

$$\phi = 22 - 5 \times 6,334 = -9,67 \text{ mm !}$$

Prema prethodnoj približnoj analizi, armatura bi na mjestima udubljenja od korozije (“pitting”) trebala biti potpuno presječena. Međutim, to se nije dogodilo, što se može objasniti zaštitnim djelovanjem sloja produkata korozije na armaturu i nedostatkom elektrolita u okolišu armature nakon otpadanja zaštitnog sloja betona.

Općenito se može u daljnjim razmatranjima usvojiti da je sačuvano manje od 70 % izvorne ploštine presjeka armaturnih šipki, tako da će se na kritičnim mjestima konstrukcije kod sanacije morati nadomjestiti sva (ili gotovo sva) potrebna armatura.

4. Kontrolni proračuni konstrukcije

4.1. Općenito o proračunu

Da bi se obuhvatila sva bitna svojstva koja utječu na razdiobu naprezanja i deformacija u armiranobetonskom dijelu konstrukcije lansirne stanice provodi se proračun korištenjem kompjutorskog programa za statički i dinamički proračun konstrukcija STAAD.Pro 2007 [12] koji se temelji na metodi konačnih elemenata. Opisi proračunskih modela i analiza djelovanja na konstrukciju slijede u nastavku.

4.2. Kombinacije djelovanja za mjerodavne proračunske situacije

Kombinacije djelovanja korištene u proračunu određene su u skladu s normama HRN ENV 1991-1-1 [13] i HRN ENV 1998-1-1 [14]. Veličine djelovanja (opterećenja) također su određene u skladu s navedenim normama. Kod proračuna graničnih stanja nosivosti treba zadovoljiti sljedeći uvjet:

$$E_d \leq R_d \quad (3)$$

gdje je:

E_d – proračunska vrijednost učinka djelovanja (presječne sile),

R_d – odgovarajuća proračunska otpornost (nosivost).

U proračunu graničnih stanja nosivosti provjeravaju se trajna i prolazna te potresna proračunska situacija. Kod trajne i prolazne proračunske situacije u obzir

se uzima stalno i uporabno opterećenje, opterećenje snijegom i djelovanje vjetra na konstrukciju. U potresnu proračunsku situaciju ulazi proračunska vrijednost potresnog djelovanja, stalno i dio uporabnog opterećenja.

Kombinacije djelovanja za trajne i prolazne proračunske situacije (osnovna kombinacija) definiraju se sljedećim kombinacijskim pravilom:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G_j} G_{kj} "+" \gamma_P P_k "+" \gamma_{Q1} Q_{k1} "+" \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q_i} \Psi_{0i} Q_{ki}, \quad (4)$$

gdje je:

“+” - oznaka za “da bude kombiniran s”,

Σ - oznaka za “kombinirani učinak”,

G_{kj} - karakteristične vrijednosti stalnih djelovanja,

P_k - karakteristična vrijednost djelovanja prednapinjanja,

Q_{k1} - karakteristične vrijednosti prevladavajućega promjenljivog djelovanja,

Q_{ki} - karakteristična vrijednost ostalih promjenljivih djelovanja,

γ_{G_j} - parcijalni koeficijent stalnoga djelovanja j,

γ_P - parcijalni koeficijent za djelovanje prouzročeno prednapinjanjem,

γ_{Q_i} - parcijalni koeficijent promjenljivoga djelovanja i,

Ψ - koeficijenti kombinacija.

Kombinacija djelovanja upotrijebljena u potresnoj proračunskoj situaciji je:

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} "+" P_k "+" \gamma_I A_{Ed} "+" \sum_{i \geq 1} \Psi_{2i} Q_{ki}, \quad (5)$$

gdje je:

γ_I - koeficijent važnosti (građevine),

A_{Ed} - proračunska vrijednost potresnog djelovanja.

Kod provjere graničnih stanja uporabljivosti provjerava se je li:

$$E_d \leq C_d, \quad (6)$$

gdje je:

E_d - proračunska vrijednost učinka djelovanja (u betonskim konstrukcijama progibi, širine pukotina, naprezanja u betonu i armaturi)

C_d - nazivna vrijednost ograničenja progiba, širine pukotina ili naprezanja.

4.3. Svojstva materijala korištena u proračunu

Svojstva betona prema navedenim ispitivanjima znatno variraju. U proračunu se koriste izvorne dimenzije presjeka armiranobetonskih konstrukcijskih elemenata, a za proračun presječnih sila i pomaka usvajaju se mehanička svojstva betona C 16/20 (MB 20), jer približno odgovaraju procijenjenoj srednjoj vrijednosti mehaničkih svojstava betona u cijeloj konstrukciji. Na taj način s prihvatljivom točnošću se uzima u obzir utjecaj krutosti konstrukcijskih elemenata na razdiobu presječnih sila u konstrukciji. Svojstva materijala upotrijebljena u proračunu su:

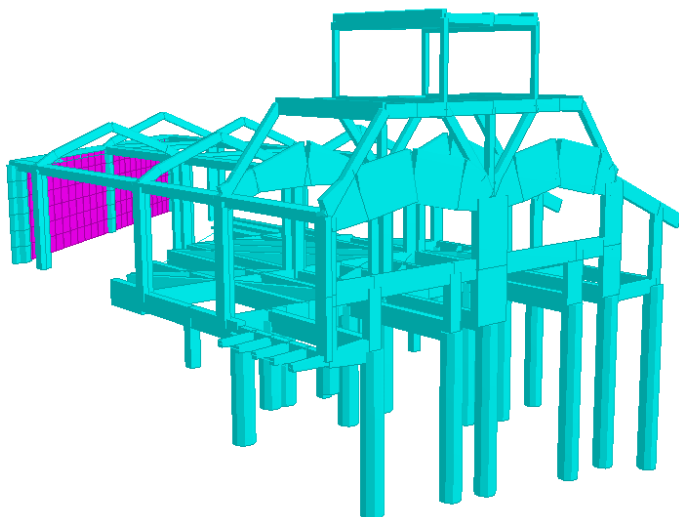
- *Beton* C 16/20, sekantni modul elastičnosti $E_{cm} = 27500 \text{ N/mm}^2$,
- *Armatura* glatka s karakterističnom granicom popuštanja: $f_{yk} = 240 \text{ N/mm}^2$ i modulom elastičnosti $E_s = 200\,000 \text{ N/mm}^2$.

4.4. Proračunski model konstrukcije

Konstrukcija je sama po sebi prilično složena, iz današnje perspektive atipična i nepravilna, pa je za postupak modeliranja potrebno proučiti i njezinu povijesnu funkciju.

Statički model postojećeg stanja konstrukcije generiran je kao prostorni štapni sustav. Model se sastoji od 365 čvorova, 327 grednih elemenata, 144 pločasta elementa te 66 oslonca.

Za drvenu visulju krovišta koje je nešto “mlađe i očuvanije” od ostatka konstrukcije korišten je ravninski model, a reakcije takvog statičkog sustava prenesene su na betonsku podkonstrukciju.



Slika 5. Proračunski model konstrukcije s prikazom poprečnih presjeka

4.5. Djelovanja na konstrukciju

Vlastita težina konstrukcije uzeta je program STAAD.Pro 2007 uzima u obzir na temelju prostornih težina i dimenzija poprečnih presjeka.

Karakteristična vrijednost *uporabnog opterećenja* prema HRN ENV 1991-2-1 [15] za razred opterećenja C3 (prostorije u kojima je moguće okupljanje ljudi – izložbeni prostori) iznosi $5,0 \text{ kN/m}^2$.

Lansirna stanica nalazi se u Rijeci i spada u područje C, dok se visina građevine kreće u granicama do 20,0 m iznad razine mora, što daje karakterističnu vrijednost *opterećenja snijegom* koja iznosi $0,45 \text{ kN/m}^2$.

Prema zemljovidu Hrvatske za područja opterećenja vjetrom područje lansirne stanice nalazi se u II vjetrovnom području s definiranom osnovnom poredbenom brzinom vjetra koja iznosi 30 m/s. Pritisak vjetra na plohe objekta određen je prema normi HRN ENV 1991-2-4 [16], koji je u konačnici raspodijeljen u čvorove objekta u vidu koncentriranih sila.

Djelovanje valova određeno je za dva mjerodavna slučaja: slučaj 1, gdje je visina vala 4,8 m koji je kritičan za grede prednjeg dijela konstrukcije te slučaj 2 s visinom vala 2,4 m koji je kritičan za grede stražnjeg dijela konstrukcije zbog toga što djeluje ispod podne konstrukcije.

Potresno djelovanje određeno je prema trenutno važećoj seizmološkoj karti za povratno razdoblje od 500 god. spada u VIII. potresno područje s proračunskim ubrzanjem tla $a_g = 0,2g$. Prema razredbi temeljnog tla u skladu s HRN ENV 1998-1-1 odabrano je tlo razreda A, a mjerodavna vrijednost faktora ponašanja q iznosi 3,0.

Provjera graničnih stanja nosivosti provedena je za proračunske presječne sile određene s pomoću programa STAAD.Pro 2007 na prostornom proračunskom modelu prikazanom na slici 5, za sljedeće mjerodavne kombinacije djelovanja (CLC):

CLC 9: $1 \times \text{stalno} + 1 \times \text{potres X} + 0,3 \times \text{potres Z} + 0,6 \times \text{uporabno}$

CLC 10: $1 \times \text{stalno} + 1 \times \text{potres X} - 0,3 \times \text{potres Z} + 0,6 \times \text{uporabno}$

CLC 11: $1 \times \text{stalno} - 1 \times \text{potres X} + 0,3 \times \text{potres Z} + 0,6 \times \text{uporabno}$

CLC 12: $1 \times \text{stalno} - 1 \times \text{potres X} - 0,3 \times \text{potres Z} + 0,6 \times \text{uporabno}$

CLC 13: $1 \times \text{stalno} + 0,3 \times \text{potres X} + 1 \times \text{potres Z} + 0,6 \times \text{uporabno}$

CLC 14: $1 \times \text{stalno} + 0,3 \times \text{potres X} - 1 \times \text{potres Z} + 0,6 \times \text{uporabno}$

CLC 15: $1 \times \text{stalno} - 0,3 \times \text{potres X} + 1 \times \text{potres Z} + 0,6 \times \text{uporabno}$

CLC 16: $1 \times \text{stalno} - 0,3 \times \text{potres X} - 1 \times \text{potres Z} + 0,6 \times \text{uporabno}$

CLC 17: 1,35×stalno + 1,5×snijeg

CLC 18: 1,35×stalno + 1,5×uporabno

CLC 19: 1,35×stalno + 1,5×valovi na ploču + 1,5×valovi na vertikalne stupove

CLC 20: 1,0×stalno + 1,0×uporabno

CLC 23: 1,35×stalno + 1,5×vjetar lijevo

CLC 24: 1,35×stalno + 1,5×vjetar desno

CLC 25: 1,35×stalno + 1,5×vjetar lijevo+ 1,5×valovi na ploču + 1,5×valovi na stupove

CLC 26: 1,35×stalno + 1,5×vjetar desno+ 1,5×val ploča + 1,5×valovi na stupove

CLC 27: 1,35×stalno + 1,5×uporabno+ 0,9×vjetar lijevo

CLC 28: 1,35×stalno + 1,5×uporabno+ 0,9×vjetar desno

4.6. Dimenzioniranje armiranobetonskih elemenata u saniranom stanju

Dimenzioniranje elemenata u saniranom stanju radi pojednostavljenja i skraćenja samog postupka provedeno je po tipovima (dimenzijama) poprečnih presjeka armiranobetonskih elemenata. U cijeloj konstrukciji razlikujemo 48 različitih karakterističnih poprečnih presjeka. Od svakog karakterističnog poprečnog presjeka pronađen je najopterećeniji element koji je dimenzioniran na koso ili jednoosno savijanje uz djelovanje tlačne ili vlačne osne sile te na poprečnu silu. Dimenzioniranje na savijanje i djelovanje osne sile proveden je programom Gala Reinforcement® [17].

Proračunski dijagrami korišteni kod dimenzioniranja su bilinearni dijagram čelika s horizontalnom granom i dijagram betona oblika parabola + pravokutnik [18]:

- granična deformacija betona : $\varepsilon_{cu2} = -3,5\%$
- deformacija kod maksimalnog naprezanja betona : $\varepsilon_{c2} = -2,0\%$
- parcijalni koeficijent za beton : $\gamma_c = 1,5$
- parcijalni koeficijent za čelik : $\gamma_s = 1,15$

Kao poprečna armatura izabrane su spone (vilice). Svojstva materijala upotrijebljena u proračunu su:

- Beton C 16/20, sekantni modul elastičnosti $E_{cm} = 27500 \text{ N/mm}^2$,
- Armatura rebrasta B500B s karakterističnom granicom popuštanja: $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$ i modulom elastičnosti $E_s = 200 \text{ 000 N/mm}^2$.

U konstrukcijskim elementima koji se saniraju i u njima se djelomično koristi i postojeća glatka armatura s granicom popuštanja 240 N/mm^2 proračunski dobivenu potrebnu količinu armature potrebno je povećati faktorom $k = 500/240 = 2,08$, iako se pri sanaciji koristi rebrasta armatura B500B.

5. Sanacija armiranobetonskog dijela konstrukcije

5.1. Odabir sanacijskih postupaka ovisno o stupnju oštećenja

S obzirom na veličinu i vrstu oštećenja armiranobetonskih konstrukcijskih elementa iznad morske razine sanaciji je moguće pristupiti na dva načina:

1. U slučaju konstrukcijskih elemenata kod kojih postoji prihvatljiva minimalna tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća na površini betona koja se nalazi u dubini promatranih elemenata iza postojeće armature moći će se provesti njihova sanacija. Na toj dubini tada će se moći obraditi površina betona dovoljno čvrsta za nanošenje odgovarajućeg sanacijskog materijala (sanacijski mort). Ovaj postupak se naziva POPRAVAK.
2. Konstrukcijski elementi kod kojih ne postoji prihvatljiva minimalna tlačna i vlačna čvrstoća betona će se ukloniti i zamijeniti, to jest na njihovim mjestima izvest će se novi armiranobetonski elementi istih vanjskih dimenzija. Ovaj postupak se naziva ZAMJENA.

Kriterij za odluku treba li element sanirati ili zamijeniti je tlačna i vlačna čvrstoća postojećeg betona u pojedinom elementu. Ako je jedna ili obje čvrstoće manja od ovih vrijednosti elemente treba u potpunosti ili djelomično zamijeniti, to jest ponovno armirati novom armaturom i betonirati:

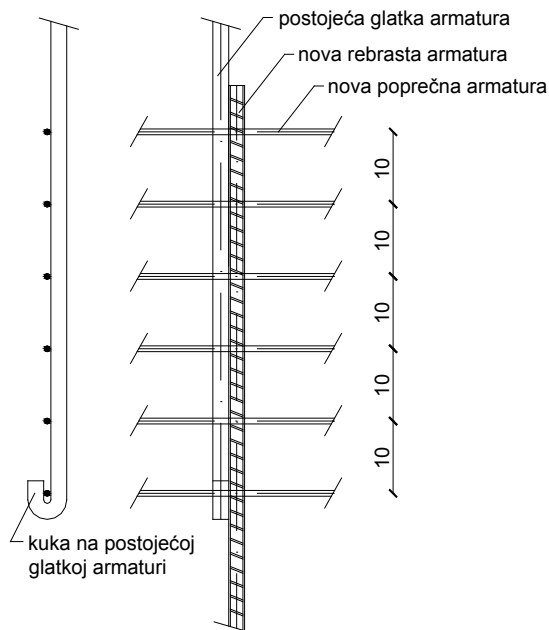
- srednja tlačna čvrstoća betona utvrđena na valjcima $d/h = 50/56 \text{ mm}$ (d je promjer, a h je visina valjka): $f_{cm} = 25 \text{ N/mm}^2$
- srednja vlačna čvrstoća površine betona iza armature na koju se nanosi reparaturni mort: $f_{ctm} = 2,0 \text{ N/mm}^2$

5.2. Potpuna ili djelomična zamjena konstrukcijskih elemenata

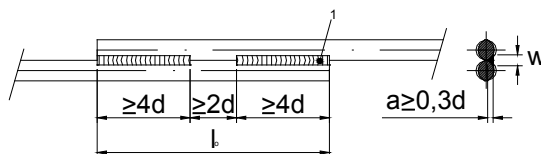
Konstrukcijske elemente koji su najviše oštećeni i izvedeni od betona nedovoljne kvalitete (vidjeti točku 5.1) predlaže se u potpunosti ili djelomično zamijeniti, to jest na njihovim mjestima izvesti novi armiranobetonski element istih vanjskih dimenzija [6, 7]. Betoniranje elemenata koji se potpuno ili djelomično zamjenjuje izvest će se na mjestu građevine, u oplati, monolitnom izvedbom. Elementi koji se vežu i oslanjaju na elemente na kojima se izvode radovi poduprijet će nosivom čeličnom skelom za podupiranje proračunane i izvedene tako da mogu nositi opterećenje od

dijela konstrukcije koji se podupire. Način podupiranja i odgovarajuće prilagodit će fazama izvedbe sanacije. Povezivanje nove armature s postojećom moguće je izvesti na dva načina: zavarivanjem gdje to kvaliteta postojeće armature dozvoljava i nastavljanjem prijklopima. Ukoliko se armatura nastavlja prijklopima na krajevima postojeće glatke armature potrebno je izraditi kuke. Postojeću armaturu treba očistiti od korozije i nečistoća. Načelni detalji nastavljanja armature prikazani su na slikama 6 i 7.

Predloženom sanacijom potrebno je osim nosivosti i uporabljivosti osigurati odgovarajuću trajnost konstrukcije. Trajnost konstrukcije određena je njezinim uporabnim vijekom nakon provedbe sanacije. Uporabni vijek novih građevina uobičajeno iznosi 50 godina. U ovom slučaju bi projektni uporabni vijek bilo dobro utvrditi u suradnji s nadležnim konzervatorskim odjelom. Pri tom je nerealno očekivati da će uporabni vijek građevine nakon sanacije biti veći od onoga koji se očekuje i projektira za novoizgrađene građevine. Ovisno o zahtijevanom uporabnom vijeku moći će se preciznije odrediti trajnosna svojstva konstrukcije: debljina zaštitni sloja betona nad armaturom, penetrabilnost betona, zaštitna sredstva, premazi, inhibitori i sl. Preliminarno se predlaže nad armaturom zaštitni sloj debljine 5 cm te razred tlačne čvrstoće betona u izmijenjene konstrukcijskim dijelovima C35/45, spravljen s najmanjom količinom cementa 340 kg/m^3 betona i uz najveći vodocementni omjer 0,45. U svježju betonsku mješavinu predlaže se dodati aminski inhibitor korozije, prema specifikacijama proizvođača i uputama tehnologa.



Slika 6. Detalj nastavljanja armature preklapanjem



- 1 - zavar
 a - debljina zavara
 d - promjer tanje od dvije zavarene šipke
 l - duljina nastavljanja
 w - širina zavara

Slika 7. Detalj nastavljanja armature zavarivanjem

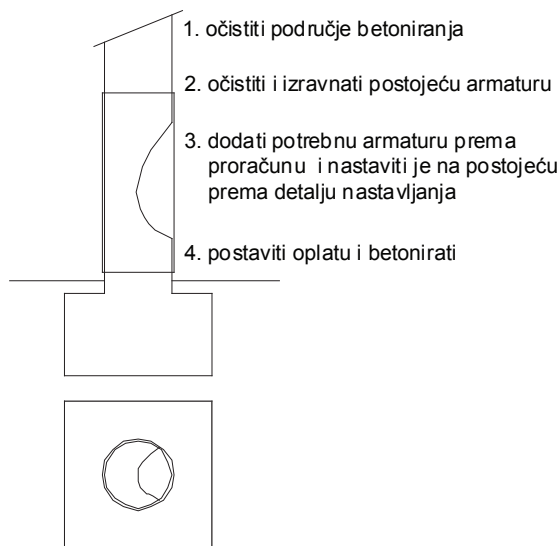
5.3. Popravak konstrukcijskih elemenata iznad razine mora

Redoslijed popravka dijelova armiranobetonske konstrukcije iznad razine mora je sljedeći:

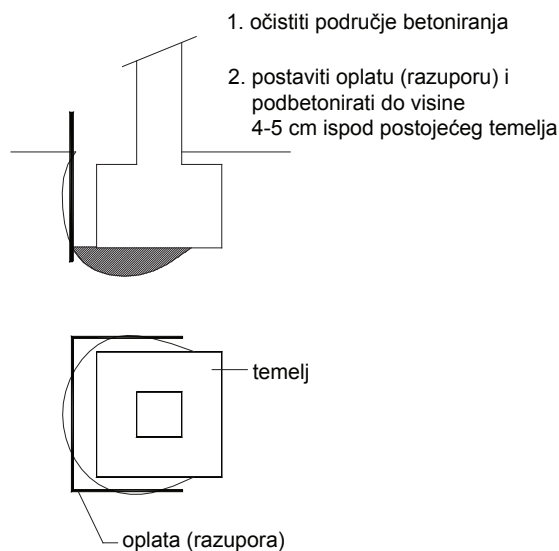
- uklanjanje zaštitnog sloja betona i lošeg raspucanog betona “do zdravog betona” vodenim topom s tlakom na mlaznici do 2000 bara u prosječnoj debljini 5 do 6 cm,
- impregnacija betona aminskim inhibitorom korozije, prije reprofiliranja betonske površine ugradnjim sanacijskog morta površinu treba oprati vodom,
- pregled i dodavanje armature na mjestima šipki sa oštećenjima većim od 10 % presjeka ili zamjena na mjestima šipki u grupi glavne armature u kojoj je 1/3 broja šipaka oštećena za više od 20 % presjeka; zaštita armature,
- obnavljanje zaštitnog sloja betona kvalitetnim alkaličnim polimercementnim reparaturnim mortom koji sadrži aminski inhibitor korozije, armiran polimernim vlakancima i kompenziranog skupljanja – torkretiranjem,
- izravnanje svih površina finim reparaturnim mortom na bazi PC-veziva koji sadrži aminski inhibitor korozije
- obrada svih površina betona nanošenjem tankoslojnog zaštitnog premaza s dodatkom aminskog inhibitora korozije preko svih površina konstrukcije u odgovarajućoj boji (ovakav zaštitni premaz osigurava vodonepropusnost, štiti beton od procesa karbonatizacije, prodora štetnih tvari kroz zaštitni sloj betona do armature čime osigurava veću trajnost konstrukcije i pridonosi ujednačenosti izgleda svih ploha).

5.4. Popravak dijelova konstrukcije ispod razine mora

Sve temelje koji su podlokani predlaže se podbetonirati betonom razreda tlačne čvrstoće C35/45. Oštećene stupove mogu se popraviti betoniranjem betonom iste kvalitete u pogodnoj oplati nakon provedenog popravka armature i pripreme postojeće površine betona radi ostvarivanja veze s novim betonom. Načelni prijedlog podbetoniranja temelja i betoniranja stupova prikazani na slikama 8 i 9.



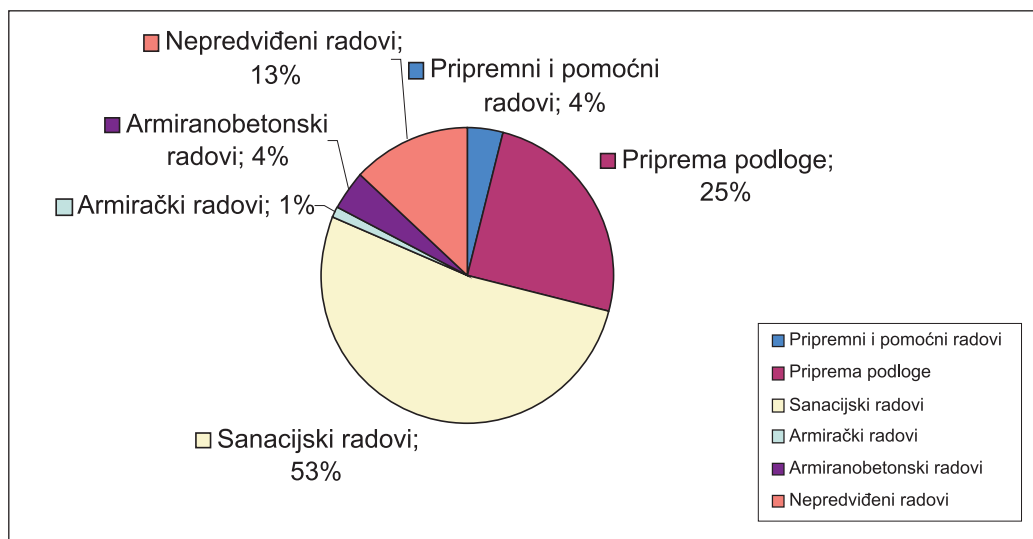
Slika 8. Postupak popravka stupa



Slika 9. Postupak podbetoniranja temelja stupa

5.5. Procjena vrijednosti predviđenih sanacijskih radova

Izrađen je troškovnik radova potrebnih kod sanacije armiranobetonske konstrukcije lansirne rampe [7]. Procjena vrijednosti predviđenih sanacijskih radova napravljena je kombinacijom metode obračunskog faktora i jediničnih cijena dobivenih od izvoditeljskih građevinskih tvrtki koje se bave sličnim poslovima. Specifični poslovi sanacije i primjena nestandardnih materijala nisu obuhvaćeni standardnim građevinskim normama, pa je navedena kombinirana metoda za procjenu troškova jedino moguća. Na taj način procijenjena vrijednost predviđenih sanacijskih radova iznosi 5.512.834,34 kn. U toj cijeni nisu obuhvaćeni radovi na sanaciji drvene konstrukcije krovništva. Najveći dio ukupne cijene, kao što je prikazano na slici 10. otpada na sanacijske radove – 53%, dok na primjer na armiranobetonske radove (zamjena elemenata) otpada 4%.



Slika 10. Prikaz razdiobe ukupne cijene prema vrsti radova [7]

Na temelju detaljnijeg troškovnika u okviru konačnog projekta sanacije (glavnog i izvedbenog) kojeg bi trebalo izraditi prije izvođenja radova mogla bi se dati preciznija procjena troškova.

Ovdje je zanimljivo navesti da je procijenjena vrijednost uklanjanja postojeće i izvedbe replike armiranobetonske konstrukcije bez sanacije drvene konstrukcije krovništva 1.986.358,58 kn [19].

6. Zaključak

Na temelju provedenog pregleda, rezultata provedenih ispitivanja i rezultata kontrolnih proračuna konstrukcije može se zaključiti da je potrebna hitna sanacija armiranobetonske konstrukcije lansirne stanice za torpeda u Rijeci jer joj prijete urušavanje. Prema provedenoj rezredbi oštećenja pojedinih skupina konstrukcijskih elemenata po metodologiji Europskog odbora za beton (CEB) stanje nosive armiranobetonske konstrukcije je kritično.

Potrebno je nastojati što prije sanirati konstrukciju lansirne stanice kako bi se, po svemu sudeći, u zadnji trenutak uspjelo spasiti ovaj vrijedan spomenik riječke industrijske baštine.

Procijenjena vrijednost predviđenih sanacijskih radova iznosi 5.512.834,34 kn. Procjena je napravljena kombinacijom metode obračunskog faktora i jediničnih cijena dobivenih od izvoditeljskih građevinskih tvrtki koje se bave sličnim poslovima. Ova procijenjena vrijednost je približna, a preciznije bi se mogla odrediti na temelju konačnog projekta sanacije, ali i tako određena cijena za investitora ima značaj projektantske procjene. Konačna cijena se formira na temelju najpovoljnije izvođačke ponude.

7. Literatura

- [1] F. Calzolaio. *Cattedrali dell'archeologia industriale costiera*, Etigraf, Venice, Italia, 2006.
- [2] Republika Hrvatska, Ministarstvo kulture. *Rješenje o upisu Lansirne stanice torpeda i kompresorske stanice za punjenje torpeda zrakom u Registar kulturnih dobara Republike Hrvatske*, klasa UP-I^o 612-08/08-06/0318, Urbroj: 532-04-01-01/4-08-2, Zagreb, 2008.
- [3] <http://www.gradri.hr/bastina/torpedo.html>
- [4] N. Palinić. Rane armiranobetonske konstrukcije u riječkoj luci, *Građevinar*, Vol. **61**, Br. 5: 435-444, 2009.
- [5] HRN EN 206-1: Beton – 1. dio: *Specifikacije, svojstva, proizvodnja i sukladnost* (prema EN 206-1:2000+A1:2004+A2:2005), HZN, Zagreb, 2006.
- [6] D. Grandić, P. Šćulac, D. Kovačević, P. Topić, N. Krvavica i dr. *Elaborat o stanju konstrukcije lansirne rampe "Torpedo" u Rijeci i mogućnostima sanacije*. Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka, 2008.
- [7] N. Grgorinić. *Sanacija armiranobetonske konstrukcije lansirne stanice "Torpedo" u Rijeci*. Diplomski rad. Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka, 2009.

- [8] *Izveštaj o pregledu konstrukcije lansirne rampe u bivšoj tvornici "Torpedo" u Rijeci*, IGH d.d. PC Rijeka, RN U7039/05, ZOP GP7039/05, Rijeka 2005.
- [9] C. Andrade, C. Alonso, J. A. Gonzales. Approach to the calculation of residual life in corroding concrete reinforcements based on corrosion intensity values. *9th European Congress of Corrosion*, Utrecht, Neurtherlands, 1989.
- [10] V. Ukrainczyk, D. Bjegović. Ispitivanje gradiva u sustavu oiguranja trajnosti betonskih konstrukcija. *Građevinski godišnjak 1995*, 209-286. Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, Zagreb 1995.
- [11] EC innovation programme IN30902I. *CONTECVET, a validated users manual for assessing the residual life of concrete structures – Manual for assessing corrosion-affected concrete structures*. Instituto Eduardo Torroja, Madrid, 2000, <http://www.ietcc.csic.es/fileadmin/Ficheros_IETcc/Web/EventosPublicaciones/PublicacionesElectronicas/manual_ingles.pdf> (pristupano 15.04.2006.).
- [12] *STAAD.Pro 2007: Technical Reference Manual*. Research Engineers International, Bentley Solutions Center, Yorba Linda CA, Exton PA, USA, 2008, <<http://docs.bentley.com/product.php?prod=207>>.
- [13] HRN ENV 1991-1, Eurokod 1: *Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije – 1. dio: Osnove projektiranja* (prema ENV 1991-1:1994), DZNM, Zagreb, 2005.
- [14] HRN ENV 1998-1-1, Eurokod 8: *Projektiranje konstrukcija otpornih na potres – 1-1.dio: Opća pravila – potresna djelovanja i opći zahtjevi za konstrukcije* (prema ENV 1998-1-1:1994), DZNM, Zagreb, 2005.
- [15] HRN ENV 1991-2-1, Eurokod 1: *Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije – 2-1.dio: Djelovanje na konstrukcije – prostorne težine, vlastita težina i uporabna opterećenja* (prema ENV 1991-2-1:1995), DZNM, Zagreb, 2005.
- [16] HRN ENV 1991-2-4, Eurokod 1: *Osnove projektiranja i djelovanja na konstrukcije -2-4.dio: Djelovanje na konstrukcije – opterećenje vjetrom* (prema ENV 1992-2-4:1995), DZNM, Zagreb, 2005.
- [17] Gala Reinforcement®, AEC Ltd., Sofia, Bulgaria, 2001.
- [18] EN 1992-1-1, Eurocode 2: *Design of concrete structures – Part 1-1: General rules for buildings*, CEN, Brusseles, 2004.
- [19] L. Buha. *Idejni projekt građenja za objekt lansirna rampa Torpedo – aproksimativni predračun troškova sanacije AB konstrukcije*. Završni rad. Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka, 2008.

Integriranje polja naprezanja u armiranobetonskim poprečnim presjecima

Integrating Stress Fields in Reinforced Concrete Cross Sections

Paulo Šćulac*, Dejan Zupan**, Gordan Jelenić*

Sažetak. Predmet ovog rada je određivanje unutarnjih sila i tangentne konstitutivne matrice ravninskog armiranobetonskog grednog nosača integracijom polja naprezanja u poprečnom presjeku. Naprezanje duž osi nosača u nekoj točki poprečnog presjeka definirano je osnom deformacijom i zadanim konstitutivnim zakonima za beton i armaturu. Korišten je konstitutivni zakon za beton dan u Eurokodu, a ponašanje armaturnog čelika opisano je bilinearnim modelom. Budući je površina čelika za armiranje zanemarivo mala u odnosu na površinu betona, pretpostavljeno je konstantno stanje naprezanja po čitavoj površini armaturne šipke (točkasti doprinos armature). U radu je dan pregled različitih metoda integracije polja naprezanja, a detaljno su opisane: (i) metoda podjele poprečnog presjeka na lamele i (ii) metoda zamjene površinskog integrala integralom po rubu presjeka. Također, provedena je i usporedba točnosti za različite poprečne presjeke.

Ključne riječi: nelinearna analiza, armirani beton, integracija polja naprezanja

Abstract. The subject of this paper is computation of stress and stress-couple resultants and the tangent material modulus matrix of a planar reinforced-concrete beam element by integrating stress field over the cross-section. The normal stress at some point of the cross section can be defined by the axial strain and constitutive laws for the concrete and the reinforcement. We use the constitutive law for the concrete given in Eurocode, while the behaviour of the reinforcing steel is defined by a bilinear law. Since the area of the steel reinforcement is negligibly small

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Viktora Cara Emina 5, Rijeka
E-mail: {paulo.sculac, gordan.jelenic}@gradri.hr

** Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana
E-mail: dejan.zupan@fgg.uni-lj.si

compared to the area of the concrete, a constant stress field over each steel bar is assumed (pointwise contribution of the reinforcement). This paper gives an overview of different methods of integration of stress fields with the following two integration methods described in detail: (i) method of dividing the cross section into layers and (ii) method of substitution of the area integral by a path integral. The two methods are compared to one another in two simple test examples.

Key words: nonlinear analysis, reinforced concrete, stress field integration

1. Uvod

Prilikom analize armiranobetonskih konstrukcija susrećemo se s materijalnom i geometrijskom nelinearnosti. Materijalna nelinearnost slijedi iz nelinearnog zakona ponašanja materijala, dok se geometrijska nelinearnost javlja uslijed postavljanja jednadžbi ravnoteže na deformiranom sustavu i nelinearne veze između deformacija i pomaka [1,2].

Predmet ovog rada je materijalna nelinearnost, točnije određivanje unutarnjih sila i tangentne konstitutivne matrice presjeka integracijom polja naprezanja u poprečnom presjeku kao nelinearne funkcije deformacija. Budući su jednadžbe problema nelinearne, i rješavaju se iterativno, integrali po poprečnom presjeku trebaju se integrirati više puta. Stoga je jako važno te integrale izračunati što je moguće efikasnije – što brže uz prihvatljivu razinu greške.

U ovom smo se radu ograničili na ravninske gredne nosače kod kojih je poprečni presjek simetričan s obzirom na vertikalnu os. Pretpostavljamo krutu vezu između betona i armature, bez mogućnosti klizanja.

Najjednostavnija metoda integriranja polja naprezanja je podjela poprečnog presjeka na tanke lamele, koje su paralelne s neutralnom osi [1]. U slučaju trapeznih lamela (koje se javljaju kod presjeka s kosim rubovima) lamelu aproksimiramo pravokutnikom. Svaka je lamela definirana debljinom i srednjom širinom. Po visini lamele pretpostavljamo konstantno stanje naprezanja. Naprezanje i tangentni modul računamo u sredini svake lamele, te ih množimo s debljinom i srednjom širinom lamele, čime dobivamo doprinos te lamele u ukupnoj rezultanti naprezanja i osnovj krutosti poprečnog presjeka. Što su lamele tanje, to će i rezultat biti bliži točnom rješenju.

Gore opisanu metodu možemo poboljšati ako najprije pronađemo aktivni dio presjeka, tj. samo onaj dio presjeka u kojem postoji polje naprezanja i samo njega podijelimo na lamele.

Ovu metodu možemo dodatno poboljšati ako unutar svake lamele koristimo numeričku integraciju u više točaka (primjerice Gaussovu). Ta će metoda biti detaljnije objašnjena u 4. poglavlju.

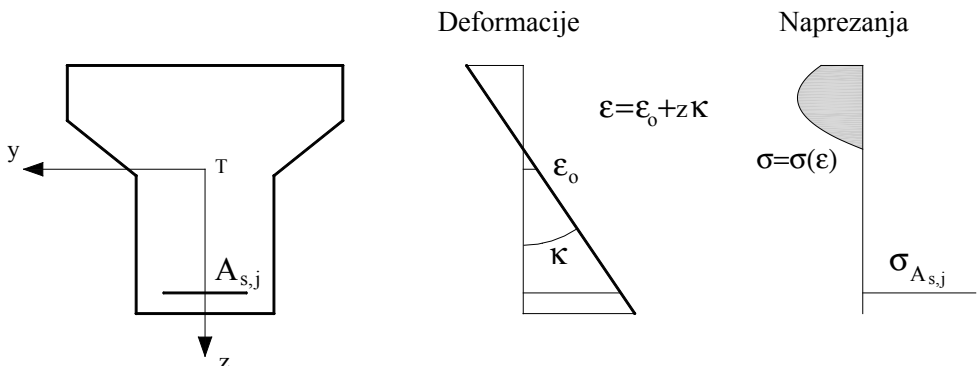
Druga vrsta metoda integracija polja naprezanja koristi Greenov teorem kako bi plošne integrale transformirala u integrale po rubu integracijske površine [3,4,5,6]. Ovom metodom se na vrlo jednostavan način mogu uključiti otvori u poprečnom presjeku. Transformirane linijske integrale možemo izračunati numerički ili analitički [4]. Detaljniji prikaz primjene Greenovog teorema uz Gaussovu numeričku integraciju dan je u 5. poglavlju.

Prilikom integracije potrebno je pripaziti na konstitutivni zakon betona. Ako funkcija kojom je opisan odnos $\sigma - \varepsilon$ betona nije derivabilna u nekoj točki (primjerice u slučaju kad je funkcija zadana po segmentima različitim izrazima), najprije treba presjek podijeliti na područja unutar kojih je funkcija derivabilna, te tek tada nastaviti s integracijom po zasebnim dijelovima [4].

Analogno se opisani postupci mogu koristiti i za slučaj prostornih nosača (u kojem se pojavljuju momenti savijanja oko obje glavne osi poprečnoga presjeka), samo što je u tom slučaju potrebno zarotirati koordinatni sustav presjeka na način da deformacija ovisi samo o jednoj osi [4,6].

2. Naprezanja i unutarnje sile u poprečnom presjeku

Promotrimo poprečni presjek sa Slike 1, koji je simetričan s obzirom na vertikalnu os z . Ishodište koordinatnog sustava yz nalazi se u težištu poprečnog presjeka.



Slika 1. Poprečni presjek oblika T, dijagram deformacija i naprezanja

Uz pretpostavku kako vrijedi Bernoullijeva hipoteza ravnih presjeka (presjeci ostaju ravni nakon deformacije), možemo definirati osnu deformaciju ε u nekoj točki poprečnog presjeka sljedećim izrazom:

$$\varepsilon(x, z) = \varepsilon_0(x) + z\kappa(x), \quad (1)$$

gdje je ε_0 osna deformacija u težištu poprečnog presjeka, a κ infinitezimalna promjena rotacije poprečnog presjeka oko osi y (koja je jednaka zakrivljenosti osi nosača u Euler-Bernoullijevoj, ali različita od nje u Timošenkovoj teoriji grednih nosača).

Promotrimo li jedan karakterističan presjek nosača, za $x = \text{const.}$, deformaciju možemo opisati kao linearnu funkciju udaljenosti od osi y presjeka, dakle $\varepsilon(x, z) = \varepsilon(z)$, $\varepsilon_0(x) = \varepsilon_0$ i $\kappa(x) = \kappa$ te imamo

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_0 + z\kappa. \quad (2)$$

Naprezanje u nekoj točki poprečnog presjeka funkcija je deformacije

$$\sigma = \sigma(\varepsilon). \quad (3)$$

Integracijom polja naprezanja dobivamo unutarnje sile u presjeku: uzdužnu silu N_x i moment savijanja M_y s obzirom na težište presjeka:

$$N_x = \int_{\mathcal{A}} \sigma dA = \int_{\mathcal{A}} \sigma(\varepsilon(z)) dA \quad (4)$$

$$M_y = \int_{\mathcal{A}} z\sigma dA = \int_{\mathcal{A}} z\sigma(\varepsilon(z)) dA.$$

Definirajmo varijacije unutarnjih sila δN_x i δM_y [7]:

$$\delta N_x = \frac{\partial N_x}{\partial \varepsilon_0} \delta \varepsilon_0 + \frac{\partial N_x}{\partial \kappa} \delta \kappa = C_{11} \delta \varepsilon_0 + C_{12} \delta \kappa \quad (5)$$

$$\delta M_y = \frac{\partial M_y}{\partial \varepsilon_0} \delta \varepsilon_0 + \frac{\partial M_y}{\partial \kappa} \delta \kappa = C_{21} \delta \varepsilon_0 + C_{22} \delta \kappa.$$

Komponente tangentne konstitutivne matrice jednake su parcijalnim derivacijama unutarnjih sila po osnovnoj deformaciji i infinitezimalnoj promjeni rotacije:

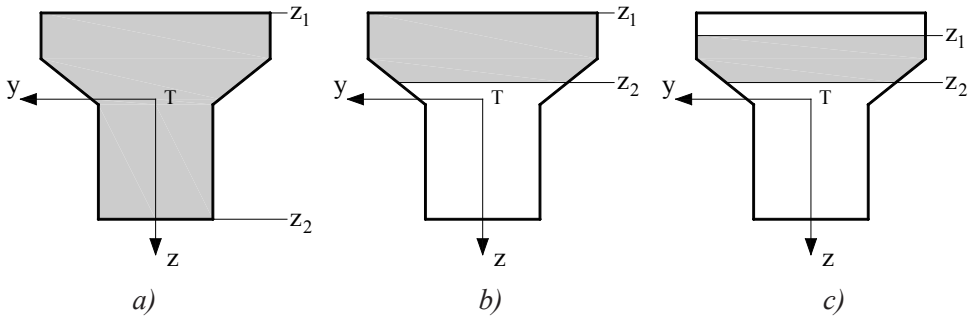
$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{\partial N_x}{\partial \varepsilon_0} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_0} \int_{\mathcal{A}} \sigma(\varepsilon(z)) dy dz \\ C_{12} &= \frac{\partial N_x}{\partial \kappa} = \frac{\partial}{\partial \kappa} \int_{\mathcal{A}} \sigma(\varepsilon(z)) dy dz \\ C_{21} &= \frac{\partial M_y}{\partial \varepsilon_0} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_0} \int_{\mathcal{A}} z\sigma(\varepsilon(z)) dy dz \\ C_{22} &= \frac{\partial M_y}{\partial \kappa} = \frac{\partial}{\partial \kappa} \int_{\mathcal{A}} z\sigma(\varepsilon(z)) dy dz. \end{aligned} \quad (6)$$

Ukoliko nam granice integrala ovise o parametru po kojem deriviramo vrijedi [8]:

$$\frac{d}{d\lambda} \int_{\alpha(\lambda)}^{\beta(\lambda)} f(x, \lambda) dx = \int_{\alpha(\lambda)}^{\beta(\lambda)} \frac{\partial f(x, \lambda)}{\partial \lambda} dx + \frac{\partial \beta(\lambda)}{\partial \lambda} f(\beta(\lambda), \lambda) - \frac{\partial \alpha(\lambda)}{\partial \lambda} f(\alpha(\lambda), \lambda) \quad (7)$$

Primijetimo kako uz prvi član, postoje još dodatna dva člana koja su jednaka umnošku derivacije promatrane granice po parametru i vrijednosti funkcije u promatranoj granici.

Ako se granice integracijskog područja z_1 i z_2 (koje ovise o definiranom konstitutivnom zakonu za beton) nalaze unutar poprečnog presjeka (Slika 2) tada moramo uvažiti dodatne članove [9].



Slika 2. a) Granice z_1 i z_2 ne ovise o parametru, b) samo granica z_2 ovisi o parametru i c) obje granice ovise o parametru

Za slučaj kad granice integracije ne ovise o parametru po kojem deriviramo, ostaje samo prvi član iz (7):

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{\partial}{\partial \epsilon_0} \int_{\mathcal{A}} \sigma(\epsilon(z)) dy dz = \int_{\mathcal{A}} \frac{\partial \sigma(\epsilon(z))}{\partial \epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial \epsilon_0} dy dz \\ C_{12} &= \frac{\partial}{\partial \kappa} \int_{\mathcal{A}} \sigma(\epsilon(z)) dy dz = \int_{\mathcal{A}} \frac{\partial \sigma(\epsilon(z))}{\partial \epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial \kappa} dy dz \\ C_{21} &= \frac{\partial}{\partial \epsilon_0} \int_{\mathcal{A}} z \sigma(\epsilon(z)) dy dz = \int_{\mathcal{A}} z \frac{\partial \sigma(\epsilon(z))}{\partial \epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial \epsilon_0} dy dz \\ C_{22} &= \frac{\partial}{\partial \kappa} \int_{\mathcal{A}} z \sigma(\epsilon(z)) dy dz = \int_{\mathcal{A}} z \frac{\partial \sigma(\epsilon(z))}{\partial \epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial \kappa} dy dz. \end{aligned} \quad (8)$$

Kako je $\partial \varepsilon / \partial \varepsilon_0 = 1$ i $\partial \varepsilon / \partial \kappa = z$ te ako za derivaciju napreznja po deformaciji (tangenti modul) uvedemo oznaku $E_t(\varepsilon(z))$ iz (8) dobivamo:

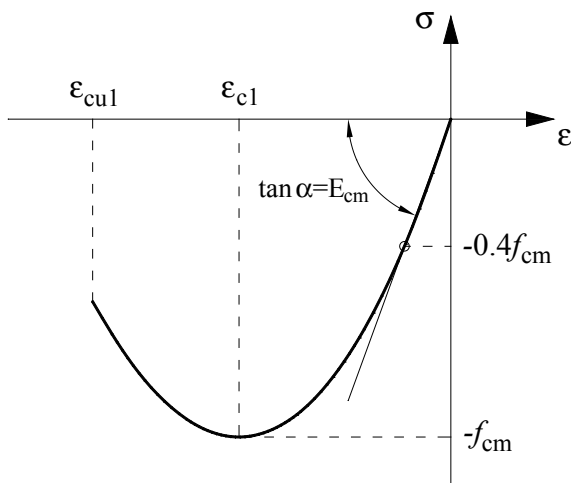
$$\begin{aligned}
 C_{11} &= \int_A E_t(\varepsilon(z)) dA \\
 C_{12} &= \int_A z E_t(\varepsilon(z)) dA \\
 C_{21} &= \int_A z E_t(\varepsilon(z)) dA \\
 C_{22} &= \int_A z^2 E_t(\varepsilon(z)) dA.
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Budući je $C_{12} = C_{21}$ u nastavku ćemo koristiti samo oznaku C_{12} .

3. Konstitutivni zakon za beton i armaturu

3.1. Konstitutivni zakon za beton

Konstitutivni zakon za beton (Slika 3) usvojen je prema EN 1992-1-1:2004 [10]. Ovim modelom zanemarena je nosivost betona u vlačnom području.



Slika 3. Konstitutivni zakon za beton prema Eurokodu [10]

Veza naprezanje – deformacija betona opisana je sljedećim zakonom:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} 0, & \varepsilon < \varepsilon_{cu1} \\ -f_{cm} \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta}, & \varepsilon_{cu1} \leq \varepsilon \leq 0 \\ 0, & 0 < \varepsilon, \end{cases} \quad (10)$$

gdje je $\eta = \varepsilon/\varepsilon_{c1}$ te $k = 1,05 E_{cm} |\varepsilon_{c1}|/f_{cm}$.

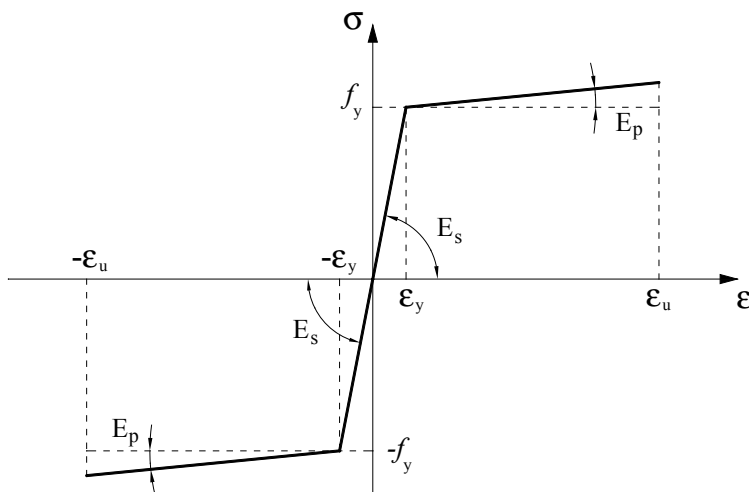
U (10) je f_{cm} srednja vrijednost tlačne čvrstoće betonskog valjka (pozitivna vrijednost), ε_{c1} tlačna deformacija betona za vršno naprezanje, ε_{cu1} granična tlačna deformacija betona, te E_{cm} sekantni modul elastičnosti betona, definiran kao nagib pravca koji prolazi kroz ishodište i točku $\sigma = 0,4 f_{cm}$ na $\sigma - \varepsilon$ dijagramu.

Derivacijom naprezanja (10) po deformaciji dobivamo tangenti modul:

$$E_t(\varepsilon) = \begin{cases} 0, & \varepsilon < \varepsilon_{cu1} \\ -\frac{f_{cm} (1-\eta)[k + (k-2)\eta]}{\varepsilon_{c1} (1 + (k-2)\eta)^2}, & \varepsilon_{cu1} \leq \varepsilon \leq 0 \\ 0, & 0 < \varepsilon. \end{cases} \quad (11)$$

3.2. Konstitutivni zakon za armaturni čelik

Čelik za armiranje opisan je bilinearnim modelom s istim ponašanjem u vlaknu i u tlaku (Slika 4).



Slika 4. Konstitutivni zakon za armaturni čelik

Ovaj konstitutivni zakon u skladu je s EN 1992-1-1:2004 [10], koji dopušta upotrebu kose grane ($E_p \neq 0$) ili horizontalne grane ($E_p = 0$) bez ograničenja deformacija.

Naprezanje čelika u ovisnosti o deformaciji dano je sa:

$$\sigma_s(\varepsilon) = \begin{cases} E_s \varepsilon, & |\varepsilon| \leq \varepsilon_y \\ \text{sign}(\varepsilon) [E_s \varepsilon_y + E_p (|\varepsilon| - \varepsilon_y)], & \varepsilon_y < |\varepsilon| \leq \varepsilon_u \\ 0, & \varepsilon_u < |\varepsilon|, \end{cases} \quad (12)$$

gdje je E_s modul elastičnosti čelika, E_p modul očvršćenja u plastičnom području, f_y naprezanje pri granici popuštanja, ε_y deformacija pri granici popuštanja, te ε_u deformacija armature pri maksimalnom opterećenju.

Prilikom određivanja tangentne konstitutivne matrice potreban je tangenti modul, za koji vrijedi:

$$E_{ts}(\varepsilon) = \begin{cases} E_s, & |\varepsilon| \leq \varepsilon_y \\ E_p, & \varepsilon_y < |\varepsilon| \leq \varepsilon_u \\ 0, & \varepsilon_u < |\varepsilon|. \end{cases} \quad (13)$$

4. Metoda podjele poprečnog presjeka na lamele

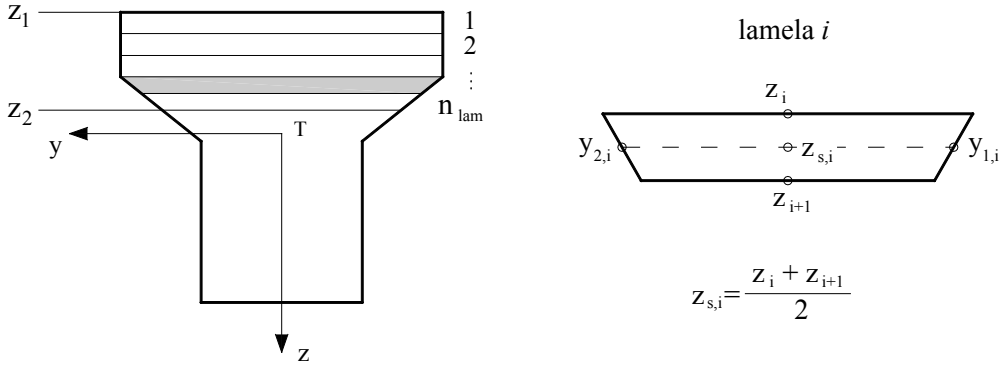
Metodu podjele poprečnog presjeka na lamele prikazati ćemo koristeći poprečni presjek prikazan na Slici 1. Postupak integracije je sljedeći:

- i. pronalazak aktivnog dijela poprečnog presjeka,
- ii. podjela aktivnog dijela poprečnog presjeka na lamele,
- iii. numerička integracija polja naprezanja po pojedinim lamelama,
- iv. zbroj doprinosa svih lamela.

U našem slučaju aktivni dio poprečnog presjeka (dio presjeka u kojem postoji polje naprezanja) je samo tlačni dio presjeka, budući da odabrani konstitutivni zakon betona zanemaruje nosivost betona u vlačnom području, a naprezanja u armaturi su koncentrirana u točkama.

Prilikom podjele aktivnog dijela poprečnog presjeka na lamele, moramo pripaziti na oblik poprečnog presjeka: ukoliko je širina presjeka promjenjiva po visini, zbog jednostavnije integracije i točnijih rezultata, presjek treba podijeliti na podpodručja u kojim nema skokovite promjene širine.

Za promatrani primjer T- presjeka podpodručja su: pojasnica i hrbat (Slika 5).



Slika 5. Podjela aktivnog dijela poprečnog presjeka na lamele, te prikaz jedne karakteristične lamele i

Kako se deformacije u slučaju ravninske analize mijenjaju samo u ovisnosti od koordinate z , integracija po presjeku odvija se samo po koordinati z , i to od z_1 do z_2 . Granice z_1 i z_2 dobivamo iz (2) za deformacije $\epsilon_1 = \epsilon_{cu1}$ i $\epsilon_2 = 0$, odnosno za $\epsilon_1 = 0$ i $\epsilon_2 = \epsilon_{cu1}$. Svaku lamelu aproksimiramo pravokutnikom, i računamo srednju širinu lamele koja je jednaka $(y_{2,i} - y_{1,i})$.

Za proizvoljnu (unutarnju) lamelu i , čije granice z_i i z_{i+1} ne ovise o parametru po kojem deriviramo, izraze (4) i (6) sad možemo zapisati kao:

$$N_{x,i} = \int_{y_{1,i}}^{y_{2,i}} \int_{z_i}^{z_{i+1}} \sigma(\epsilon(z)) dy dz = (y_{2,i} - y_{1,i}) \int_{z_i}^{z_{i+1}} \sigma(\epsilon(z)) dz \tag{14}$$

$$M_{y,i} = \int_{y_{1,i}}^{y_{2,i}} \int_{z_i}^{z_{i+1}} z \sigma(\epsilon(z)) dy dz = (y_{2,i} - y_{1,i}) \int_{z_i}^{z_{i+1}} z \sigma(\epsilon(z)) dz,$$

$$C_{11,i} = \int_{y_{1,i}}^{y_{2,i}} \int_{z_i}^{z_{i+1}} E_t(\epsilon(z)) dy dz = (y_{2,i} - y_{1,i}) \int_{z_i}^{z_{i+1}} E_t(\epsilon(z)) dz$$

$$C_{12,i} = \int_{y_{1,i}}^{y_{2,i}} \int_{z_i}^{z_{i+1}} z E_t(\epsilon(z)) dy dz = (y_{2,i} - y_{1,i}) \int_{z_i}^{z_{i+1}} z E_t(\epsilon(z)) dz \tag{15}$$

$$C_{22,i} = \int_{y_{1,i}}^{y_{2,i}} \int_{z_i}^{z_{i+1}} z^2 E_t(\epsilon(z)) dy dz = (y_{2,i} - y_{1,i}) \int_{z_i}^{z_{i+1}} z^2 E_t(\epsilon(z)) dz.$$

Integrale u (14) i (15) odrediti ćemo numerički koristeći Gaussove integracijske formule [8]. Za slučaj uzdužne sile integral možemo prevesti na sumu na sljedeći način:

$$\int_{z_i}^{z_{i+1}} \sigma(\varepsilon(z)) dz = \frac{z_{i+1} - z_i}{2} \sum_{s=1}^M w_s \sigma(\varepsilon(z_s)) \quad (16)$$

$$z_s = z(\xi_s) = \frac{1}{2}(1 - \xi_s)z_i + \frac{1}{2}(1 + \xi_s)z_{i+1} \quad (17)$$

$$\varepsilon(z_s) = \varepsilon_0 + z_s \kappa \quad (18)$$

gdje je M broj Gaussovih integracijskih točaka, a w_s težinski faktor u integracijskoj točki ξ_s . Analogno provodimo i za ostale integrale iz (14) i (15).

Prilikom proračuna komponenti tangentne konstitutivne matrice dodatnu pažnju moramo obratiti na derivaciju određenog integrala po parametru.

U (15) koristili smo samo prvi član iz (7), pa u nastavku izvodimo i preostala dva dodatna člana za slučaj kad granice z_1 i z_2 ovise o parametru po kojem deriviramo.

Iz (2) dobivamo

$$\frac{\partial z_1}{\partial \varepsilon_0} = -\frac{1}{\kappa} \quad \frac{\partial z_2}{\partial \varepsilon_0} = -\frac{1}{\kappa} \quad (19)$$

$$\frac{\partial z_1}{\partial \kappa} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{\kappa} = -\frac{z_1}{\kappa} \quad \frac{\partial z_2}{\partial \kappa} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_0}{\kappa} = -\frac{z_2}{\kappa} \quad (20)$$

Dodatni su članovi jednaki:

$$\begin{aligned} C_{11} &= -b(z_2) \frac{1}{\kappa} \sigma(\varepsilon(z_2)) + b(z_1) \frac{1}{\kappa} \sigma(\varepsilon(z_1)) \\ C_{12} &= -b(z_2) \frac{z_2}{\kappa} \sigma(\varepsilon(z_2)) + b(z_1) \frac{z_1}{\kappa} \sigma(\varepsilon(z_1)) \\ C_{22} &= -b(z_2) \frac{z_2^2}{\kappa} \sigma(\varepsilon(z_2)) + b(z_1) \frac{z_1^2}{\kappa} \sigma(\varepsilon(z_1)), \end{aligned} \quad (21)$$

gdje su $b(z_2)$ i $b(z_1)$ širine poprečnog presjeka u z_2 i z_1 .

S izabranim načinom numeričke integracije po lameli, s poznatim koordinatama integracijskih točaka z_s , naprezanjem i tangentnim modulom

elastičnosti u betonu, integraciju po aktivnom dijelu presjeka možemo zapisati formulama:

$$\begin{aligned} N_x &= \sum_{i=1}^{n_{lam}} \left[(y_{2,i} - y_{1,i}) \frac{z_{i+1} - z_i}{2} \sum_{s=1}^M w_s \sigma(\epsilon(z_s)) \right] \\ M_y &= \sum_{i=1}^{n_{lam}} \left[(y_{2,i} - y_{1,i}) \frac{z_{i+1} - z_i}{2} \sum_{s=1}^M z_s w_s \sigma(\epsilon(z_s)) \right], \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} C_{11} &= \sum_{i=1}^{n_{lam}} \left[(y_{2,i} - y_{1,i}) \frac{z_{i+1} - z_i}{2} \sum_{s=1}^M w_s E_t(\epsilon(z_s)) \right] - b(z_2) \frac{1}{\kappa} \sigma(\epsilon(z_2)) + \\ &\quad + b(z_1) \frac{1}{\kappa} \sigma(\epsilon(z_1)) \\ C_{12} &= \sum_{i=1}^{n_{lam}} \left[(y_{2,i} - y_{1,i}) \frac{z_{i+1} - z_i}{2} \sum_{s=1}^M z_s w_s E_t(\epsilon(z_s)) \right] - b(z_2) \frac{z_2}{\kappa} \sigma(\epsilon(z_2)) + \\ &\quad + b(z_1) \frac{z_1}{\kappa} \sigma(\epsilon(z_1)) \\ C_{22} &= \sum_{i=1}^{n_{lam}} \left[(y_{2,i} - y_{1,i}) \frac{z_{i+1} - z_i}{2} \sum_{s=1}^M z_s^2 w_s E_t(\epsilon(z_s)) \right] - b(z_2) \frac{z_2^2}{\kappa} \sigma(\epsilon(z_2)) + \\ &\quad + b(z_1) \frac{z_1^2}{\kappa} \sigma(\epsilon(z_1)), \end{aligned} \quad (23)$$

gdje je n_{lam} ukupan broj lamela u aktivnom dijelu presjeka.

Posebni se problemi mogu pojaviti kod presjeka s otvorima, pa se u tim slučajevima poprečni presjek može zadati kao kombinacija više poligonalnih presjeka, te izvršiti integraciju po svakom poligonu zasebno, a rezultate zbrojiti.

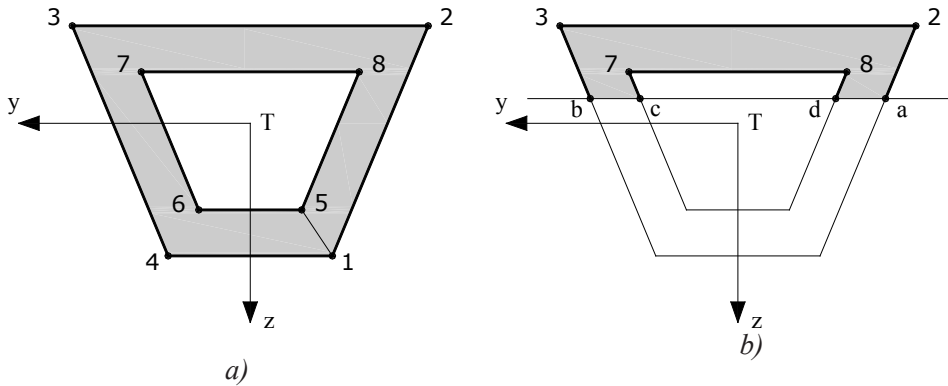
5. Metoda zamjene površinskog integrala integralom po rubu presjeka

Postupak koji je opisan u nastavku vrlo je pogodan za primjenu kod presjeka s jednim ili više otvora. Poprečni presjek zadaje se kao zatvoreni poligon: vanjski rub presjeka zadaje se u pozitivnom smjeru (smjer obrnuto od kazaljke na satu), dok se otvor zadaje u negativnom smjeru (u smjeru kazaljke na satu).

Za primjer sa Slike 6, poprečni presjek zadajemo kao zatvoreni poligon od sljedećeg niza točaka: 1 2 3 4 1 5 6 7 8 5 1, koji nam definira moguće integracijsko područje. Segment između točaka 1 i 5 se pojavljuje dvaput, ali s različitim redoslijedom, pa se prilikom integriranja ti utjecaji međusobno ponište.

Postupak možemo podijeliti na tri faze:

- i. pronalazak aktivnog dijela presjeka (u našem slučaju tlačni dio presjeka)
- ii. transformacija površinskog integrala na integral po rubu integracijskog područja
- iii. izračun linijskog integrala Gaussovima kvadraturnim formulama.



Slika 6. a) Primjer poprečnog presjeka s otvorom, b) proizvoljan aktivan dio presjeka

Kako bismo pronašli aktivni dio presjeka, potrebno je odrediti presjecišta poprečnog presjeka i neutralne osi. Na presjeku sa Slike 6 b) ta su presjecišta označena točkama a, b, c i d, dok aktivni dio presjeka predstavlja zatvoreni poligon a 2 3 b c 7 8 d a.

Pomoću Greenovog teorema [8] dvostruki integral po površini A transformiramo u linijski integral po zatvorenoj krivulji C koja omeđuje površinu A

$$\int_A \left(\int \frac{\partial Q}{\partial y} - \frac{\partial P}{\partial z} \right) dydz = \oint_C (Pdy + Qdz), \quad (24)$$

gdje su P i Q funkcije od y i z .

Za $P = 0$, $\partial P / \partial z = 0$ pa ostaje samo funkcija Q što znači da integriramo samo po visini poprečnog presjeka.

Za uzdužnu silu tako imamo:

$$N_x = \iint_A \sigma(\epsilon(z)) dydz = \iint_A \frac{\partial Q}{\partial y} dydz = \oint_C Qdz, \quad (25)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial y} = \sigma(\varepsilon(z)) \quad (26)$$

$$Q = y\sigma(\varepsilon(z)).$$

Analogno se mogu prevesti i ostali integrali iz (4) i (6).

Unutarnje sile i komponente tangentne konstitutivne matrice tako postaju:

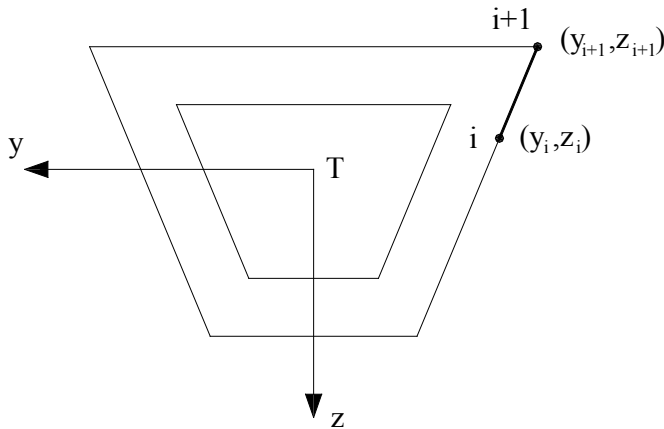
$$N_x = \oint_C y\sigma(\varepsilon(z))dz \quad (27)$$

$$M_y = \oint_C yz\sigma(\varepsilon(z))dz,$$

$$C_{11} = \oint_C yE_t(\varepsilon(z))dz$$

$$C_{12} = \oint_C yzE_t(\varepsilon(z))dz \quad (28)$$

$$C_{22} = \oint_C yz^2E_t(\varepsilon(z))dz.$$



Slika 7. Koordinate promatranog ruba

Rub integracijskog područja sastoji od pravaca (Slika 7), koji povezuju točku $i (y_i, z_i)$ s točkom $i+1 (y_{i+1}, z_{i+1})$. Jednadžbu promatranog ruba možemo zapisati kao

$$z - z_i = \frac{z_{i+1} - z_i}{y_{i+1} - y_i} (y - y_i) \quad (29)$$

odnosno

$$y = k_i z + n_i, \quad (30)$$

gdje je $k_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{z_{i+1} - z_i}$, a $n_i = y_i - k_i z_i$.

Kako je rub integracijskog područja poligon, linijski se integral sastoji od sume integrala uzduž rubova poligona, pa uvrštavanjem (30) u (27) i (28) slijedi:

$$N_x = \sum_{i=1}^N (k_i I_{2,i} + n_i I_{1,i}) \quad (31)$$

$$M_y = \sum_{i=1}^N (k_i I_{3,i} + n_i I_{2,i}),$$

$$C_{11} = \sum_{i=1}^N (k_i J_{2,i} + n_i J_{1,i})$$

$$C_{12} = \sum_{i=1}^N (k_i J_{3,i} + n_i J_{2,i}) \quad (32)$$

$$C_{22} = \sum_{i=1}^N (k_i J_{4,i} + n_i J_{3,i}),$$

gdje su

$$\begin{aligned} I_{1,i} &= \int_{z_i}^{z_{i+1}} \sigma(\varepsilon(z)) dz & J_{1,i} &= \int_{z_i}^{z_{i+1}} E_t(\varepsilon(z)) dz \\ I_{2,i} &= \int_{z_i}^{z_{i+1}} z \sigma(\varepsilon(z)) dz & J_{2,i} &= \int_{z_i}^{z_{i+1}} z E_t(\varepsilon(z)) dz \\ I_{3,i} &= \int_{z_i}^{z_{i+1}} z^2 \sigma(\varepsilon(z)) dz & J_{3,i} &= \int_{z_i}^{z_{i+1}} z^2 E_t(\varepsilon(z)) dz \\ & & J_{4,i} &= \int_{z_i}^{z_{i+1}} z^3 E_t(\varepsilon(z)) dz, \end{aligned} \quad (33)$$

a N ukupan broj rubova poligona integracijskog područja. Integrale (33) nadalje izračunavamo s pomoću Gaussovih integracijskih formula kao što je to opisano formulama (16-18) u prethodnom poglavlju.

I ovdje kao i kod metode podjele poprečnog presjeka na lamele moramo uzeti u obzir dodatne članove (prema (7)) ukoliko nam granice integracije z_1 i z_2 ovise

o parametru po kojem deriviramo. Te dodatne članove možemo izračunati na isti način kao što je to opisano izrazima (21) u prethodnom poglavlju.

Stoga, ako komponentama tangentne konstitutivne matrice (32) dodamo još i dodatne članove (21) za slučaj derivacije integrala po parametru konačno dobivamo:

$$\begin{aligned}
 C_{11} &= \sum_{i=1}^N (k_i J_{2,i} + n_i J_{1,i}) - b(z_2) \frac{1}{\kappa} \sigma(\varepsilon(z_2)) + b(z_1) \frac{1}{\kappa} \sigma(\varepsilon(z_1)) \\
 C_{12} &= \sum_{i=1}^N (k_i J_{3,i} + n_i J_{2,i}) - b(z_2) \frac{z_2}{\kappa} \sigma(\varepsilon(z_2)) + b(z_1) \frac{z_1}{\kappa} \sigma(\varepsilon(z_1)) \\
 C_{22} &= \sum_{i=1}^N (k_i J_{4,i} + n_i J_{3,i}) - b(z_2) \frac{z_2^2}{\kappa} \sigma(\varepsilon(z_2)) + b(z_1) \frac{z_1^2}{\kappa} \sigma(\varepsilon(z_1)).
 \end{aligned} \tag{34}$$

6. Utjecaj armature u presjeku

Zbog relativno malene površine čelika za armiranje u odnosu na površinu betona, možemo pretpostaviti konstantno stanje naprezanja po čitavoj površini armaturene šipke (točkasti doprinos armature).

Svaku je armaturnu šipku j u poprečnom presjeku dovoljno opisati s dva parametra: koordinatom težišta z_j i površinom poprečnog presjeka $A_{s,j}$. Budući promatramo samo ravninske nosače, koordinata težišta y_j nije potrebna u proračunu; može nam zatrebati samo kod grafičkog prikaza presjeka.

Unutarnje sile uslijed pretpostavljenog točkastog doprinosa armature dobivamo iz:

$$\begin{aligned}
 N_x &= \sum_{j=1}^n A_{s,j} \sigma_{s,j}(\varepsilon(z_j)) \\
 M_y &= \sum_{j=1}^n z_j A_{s,j} \sigma_{s,j}(\varepsilon(z_j)),
 \end{aligned} \tag{35}$$

dok su komponente tangentne konstitutivne matrice jednake:

$$\begin{aligned}
 C_{11} &= \sum_{j=1}^n A_{s,j} E_{ts,j}(\varepsilon(z_j)) \\
 C_{12} = C_{21} &= \sum_{j=1}^n z_j A_{s,j} E_{ts,j}(\varepsilon(z_j)) \\
 C_{22} &= \sum_{j=1}^n z_j^2 A_{s,j} E_{ts,j}(\varepsilon(z_j)),
 \end{aligned} \tag{36}$$

gdje su $\sigma_{s,j}$ i $E_{ts,j}$, redom, naprezanje i modul elastičnosti čelika za armiranje u težištu armaturne šipke j . Indeks j u (35) i (36) poprima vrijednosti od 1 do n , gdje je n ukupan broj šipki u poprečnom presjeku.

Kako bi izbjegli dvostruko zbrajanje površine betona na mjestima armaturnih šipki (na mjestu gdje su šipke u betonskom presjeku su rupe), na analogan način, pretpostavljajući konstantno stanje naprezanja, možemo odrediti doprinos “nepostojećeg” betona, tako da u gornjim izrazima $\sigma_{s,j}$ zamijenimo sa $\sigma_{c,j}$ te $E_{ts,j}$ sa $E_{tc,j}$. $\sigma_{c,j}$ i $E_{tc,j}$ predstavljaju naprezanje i modul elastičnosti betona u težištu armaturne šipke j .

Oduzmemo li doprinos “nepostojećeg” betona iz (35) i (36) konačno dobivamo:

$$N_x = \sum_{j=1}^n A_{s,j} (\sigma_{s,j}(\epsilon(z_j)) - \sigma_{c,j}(\epsilon(z_j))) \quad (37)$$

$$M_y = \sum_{j=1}^n z_j A_{s,j} (\sigma_{s,j}(\epsilon(z_j)) - \sigma_{c,j}(\epsilon(z_j))),$$

$$C_{11} = \sum_{j=1}^n A_{s,j} (E_{ts,j}(\epsilon(z_j)) - E_{tc,j}(\epsilon(z_j)))$$

$$C_{12} = \sum_{j=1}^n z_j A_{s,j} (E_{ts,j}(\epsilon(z_j)) - E_{tc,j}(\epsilon(z_j))) \quad (38)$$

$$C_{22} = \sum_{j=1}^n z_j^2 A_{s,j} (E_{ts,j}(\epsilon(z_j)) - E_{tc,j}(\epsilon(z_j))).$$

Vrijednosti dobivene pomoću (37) i (38) pribrajamo vrijednostima dobivenim integracijom betonskog dijela presjeka.

7. Primjeri

Pri izradi numeričkih primjera zanemaren je utjecaj armature u presjeku, jer za pretpostavljeno konstantno stanje naprezanja u armaturnim šipkama nije potrebna integracija, pa stoga armatura ne utječe na točnost integracijskog postupka i usporedbu rezultata. Primjeri su izrađeni pomoću programskog paketa *Matlab*.

U oba primjera korišten je beton sljedećih karakteristika:

$$f_{cm} = 38 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 33000 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{c1} = -2,2 \times 10^{-3}$$

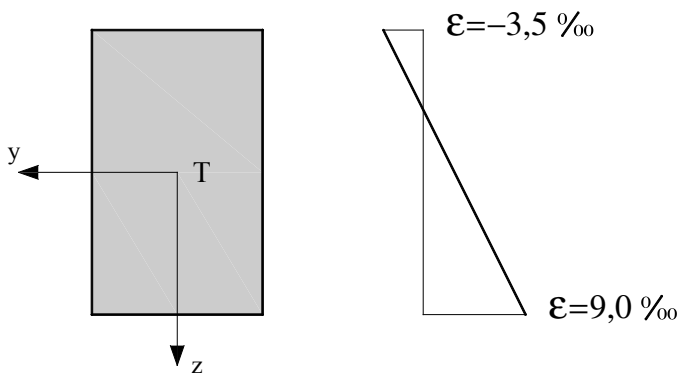
$$\varepsilon_{cut1} = -3,5 \times 10^{-3}$$

Kao točno rješenje T usvojeno je analitičko rješenje dobiveno pomoću programskog paketa *Mathematica*, u kojem je rješenje (određeni integral) određeno analitički.

Relativna je greška u postocima definirana kao $\frac{|R_n - T|}{|T|} \times 100$, gdje je R_n rješenje za slučaj n.

7.1. Primjer 1

Za prvi je primjer odabran pravokutni poprečni presjek dimenzija 30x50 cm (Slika 8), te $\varepsilon_0 = 0,00275$ i $\kappa = 0,025 \frac{1}{m}$.



Slika 8. Pravokutni poprečni presjek i dijagram deformacija za odabrani ε_0 i κ

U nastavku u Tablicama 1 i 2, dan je prikaz relativne greške u odnosu na točno rješenje:

$$\begin{aligned} N_x &= -1193,7055217826 \text{ kN} & C_{11} &= 298295,4262722834 \text{ kN} \\ M_y &= 22700,234531371 \text{ kNcm} & C_{12} &= -2682563,56730145 \text{ kNcm} \\ & & C_{22} &= 4832775,30111319 \text{ kNcm}^2. \end{aligned}$$

Možemo primijetiti kako je rješenje dobiveno koristeći samo jednu lamelu (Tablica 1), potpuno isto rješenju dobivenom pomoću metode zamjene površinskog integrala integralom po rubu za isti broj Gaussovih integracijskih točaka (Tablica 2), što se može analitički i pokazati: za $y_1 = y_2$ iz (30) dobivamo kako je $y = \text{const.} = y_1 = y_2$ pa onda izrazi (31) i (32) postaju isti kao (14) i (15).

Za najjednostavniji slučaj s jednom lamelom i 2 integracijske točke relativna je greška za unutarnje sile i komponente tangentne konstitutivne matrice manja od 1%.

Tablica 1. Relativna greška u postocima za metodu podjele poprečnog presjeka na lamele (pravokutni poprečni presjek)

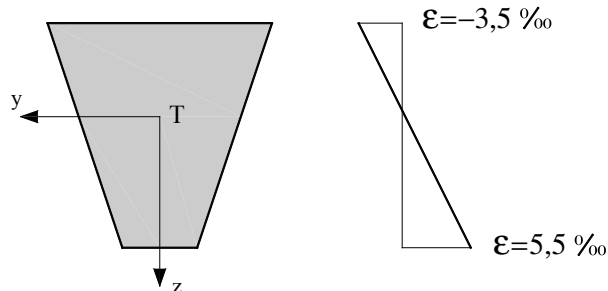
	Br. lamela	Broj Gaussovih integracijskih točaka			
		2	3	5	10
N_x	1	1,72E-04	7,41E-08	7,31E-08	7,31E-08
M_y		1,31E-02	5,66E-06	5,58E-06	5,58E-06
C_{11}		9,44E-06	5,46E-11	1,33E-10	1,33E-10
C_{12}		1,21E-03	3,05E-08	4,12E-08	4,12E-08
C_{22}		7,22E-01	7,14E-06	1,37E-08	1,37E-08
N_x	2	1,08E-05	7,31E-08	7,31E-08	7,31E-08
M_y		8,22E-04	5,58E-06	5,58E-06	5,58E-06
C_{11}		5,90E-07	1,31E-10	1,33E-10	1,33E-10
C_{12}		7,54E-05	4,10E-08	4,12E-08	4,12E-08
C_{22}		4,51E-02	1,25E-07	1,37E-08	1,37E-08
N_x	3	2,20E-06	7,31E-08	7,31E-08	7,31E-08
M_y		1,67E-04	5,58E-06	5,58E-06	5,58E-06
C_{11}		1,16E-07	1,33E-10	1,33E-10	1,33E-10
C_{12}		1,49E-05	4,12E-08	4,12E-08	4,12E-08
C_{22}		8,91E-03	2,35E-08	1,37E-08	1,37E-08
N_x	5	3,49E-07	7,31E-08	7,31E-08	7,31E-08
M_y		2,65E-05	5,58E-06	5,58E-06	5,58E-06
C_{11}		1,50E-08	1,33E-10	1,33E-10	1,33E-10
C_{12}		1,89E-06	4,12E-08	4,12E-08	4,12E-08
C_{22}		1,15E-03	1,42E-08	1,37E-08	1,37E-08
N_x	10	9,03E-08	7,31E-08	7,31E-08	7,31E-08
M_y		6,89E-06	5,58E-06	5,58E-06	5,58E-06
C_{11}		8,11E-10	1,33E-10	1,33E-10	1,33E-10
C_{12}		7,96E-08	4,12E-08	4,12E-08	4,12E-08
C_{22}		7,22E-05	1,37E-08	1,37E-08	1,37E-08

Tablica 2. Relativna greška u postocima za metodu zamjene površinskog integrala integralom po rubu (pravokutni poprečni presjek)

	Broj Gaussovih integracijskih točaka			
	2	3	5	10
N_x	1,72E-04	7,41E-08	7,31E-08	7,31E-08
M_y	1,31E-02	5,66E-06	5,58E-06	5,58E-06
C_{11}	9,44E-06	5,46E-11	1,33E-10	1,33E-10
C_{12}	1,21E-03	3,05E-08	4,12E-08	4,12E-08
C_{22}	7,22E-01	7,14E-06	1,37E-08	1,37E-08

7.2. Primjer 2

Za drugi smo primjer odabrali trapezni presjek (Slika 9), kako bismo usporedili metode u slučaju kosog ruba. Dimenzije poprečnog presjeka su: donji rub 30 cm, gornji rub 90 cm, te visina 90 cm. Odabrane vrijednosti za deformacijske veličine su $\varepsilon_0 = 0,00025$ i $\kappa = 0,010 \frac{1}{m}$.

**Slika 9.** Trapezni poprečni presjek i dijagram deformacija za odabrani ε_0 i κ

Točna rješenja za unutarnje sile i komponente konstitutivne matrice su:

$$\begin{aligned}
 N_x &= -7960,7909607438 \text{ kN} & C_{11} &= 1574045,960469985 \text{ kN} \\
 M_y &= 184267,8831955592 \text{ kNcm} & C_{12} &= 10661177,03982036 \text{ kNcm} \\
 & & C_{22} &= -924343509,6218971 \text{ kNcm}^2.
 \end{aligned}$$

U Tablicama 3 i 4 dana su rješenja dobivena metodama opisanima u poglavljima 4 i 5. Općenito, greške kod unutarnjih sila su manje nego li greške kod komponenti tangente konstitutivne matrice.

Promotrimo li podatke u Tablici 3, možemo primijetiti kako se u slučaju presjeka s kosim rubom samo povećanjem broja integracijskih točaka (npr. s 2 na 5) za isti broj lamela greška vrlo malo smanjuje.

Koristimo li samo jednu lamelu, greške kod uzdužne sile i momenta su unutar 5%, dok se kod komponenti tangentne konstitutivne matrice znatno povećavaju – čak do 54%. Potrebno nam je čak 10 lamela kako bi relativna greška svih podataka bila unutar 0,5%. Do tako velike greške dolazi jer je širina lamele promjenjiva po visini, tj. lamela nije pravokutnik, već trapez, pa bi za dobivanje točnijeg rezultata s manjim brojem lamela umjesto jednodimenzionalne Gaussove integracije trebalo upotrijebiti dvodimenzionalnu integraciju.

Kod metode sa zamjenom površinskog integrala integralom po rubu (Tablica 4), vrlo dobar rezultat dobivamo samo s 2 integracijske točke, a već s 3 integracijske točke greška je manja od 0,005%.

Tablica 3. Relativna greška u postocima za metodu podjele poprečnog presjeka na lamele (trapezni poprečni presjek)

	Br. lamela	Broj Gaussovih integracijskih točaka			
		2	3	5	10
N_x	1	2,11704	2,11721	2,11721	2,11721
M_y		4,70378	4,67732	4,67732	4,67732
C_{11}		23,70707	23,70708	23,70708	23,70708
C_{12}		54,02312	54,01812	54,01812	54,01812
C_{22}		16,02990	16,18668	16,18669	16,18669
N_x	2	0,53077	0,53078	0,53078	0,53078
M_y		0,94039	0,93874	0,93874	0,93874
C_{11}		5,92685	5,92685	5,92685	5,92685
C_{12}		13,47206	13,47175	13,47175	13,47175
C_{22}		4,94552	4,95531	4,95531	4,95531
N_x	3	0,23602	0,23602	0,23602	0,23602
M_y		0,39903	0,39871	0,39871	0,39871
C_{11}		2,63416	2,63416	2,63416	2,63416
C_{12}		5,98481	5,98475	5,98475	5,98475
C_{22}		2,27294	2,27488	2,27488	2,27488
N_x	5	0,08499	0,08499	0,08499	0,08499
M_y		0,14067	0,14063	0,14063	0,14063
C_{11}		0,94830	0,94830	0,94830	0,94830
C_{12}		2,15402	2,15401	2,15401	2,15401
C_{22}		0,82959	0,82985	0,82985	0,82985
N_x	10	0,02125	0,02125	0,02125	0,02125
M_y		0,03550	0,03549	0,03549	0,03549
C_{11}		0,23708	0,23708	0,23708	0,23708
C_{12}		0,53845	0,53845	0,53845	0,53845
C_{22}		0,20545	0,20547	0,20547	0,20547

Tablica 4. *Relativna greška u postocima za metodu zamjene površinskog integrala integralom po rubu (trapezni poprečni presjek)*

	Broj Gaussovih integracijskih točaka			
	2	3	5	10
N_x	5,07E-03	2,64E-06	2,61E-06	2,61E-06
M_y	7,95E-01	9,38E-04	9,43E-04	9,43E-04
C_{11}	2,79E-04	1,15E-07	1,12E-07	1,12E-07
C_{12}	1,12E-01	3,34E-06	2,23E-06	2,23E-06
C_{22}	3,08E+00	4,57E-03	4,61E-03	4,61E-03

8. Zaključak

U ovom su radu prikazane dvije metode dobivanja unutarnjih sila i tangentne konstitutivne matrice presjeka integracijom polja naprezanja u poprečnom presjeku, za slučaj ravninskih armiranobetonskih grednih nosača.

Prva se metoda sastoji od podjele aktivnog dijela presjeka na lamele, dok se druga metoda temelji na Greenovom teoremu o zamjeni površinskog integrala integralom po rubu integracijske površine. Dobiveni se integrali izračunavaju numerički koristeći Gaussove integracijske formule. U obje je metode prije same integracije najprije potrebno pronaći aktivni dio presjeka – dio presjeka u kojem postoji polje naprezanja.

Doprinos armature u presjeku usvojen je kao točkasti – pretpostavljeno je konstantno stanje naprezanja po čitavoj površini armaturene šipke.

Usporedbom dviju metoda pokazano je kako u slučaju pravokutnih presjeka ne postoji znatne razlike između rezultata metoda, te se pomoću jedne ili druge metode može uz vrlo malen broj integracijskih točaka dobiti točno rješenje.

No u slučaju kosih rubova to nije slučaj, pa se kod presjeka s kosim rubovima preporuča uporaba metode sa zamjenom površinskog integrala integralom po rubu presjeka jer se za puno manji broj integracijskih točaka dobiva točniji rezultat u odnosu na opisani postupak s lamelama.

U radu nisu razmatrani efekti rasterećenja, kao ni ugradnja ove procedure u širi kontekst programa po metodi konačnih elemenata. Definiranje odgovarajućih procedura predmet je budućeg istraživanja autora.

Zahvala. *Prikazani rezultati proizašli su iz znanstvenog projekta br. 114-0000000-3025 (Unapređenje točnosti nelinearnih grednih elemenata s neograničenim 3D rotacijama) provođenog uz potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske, bilateralnog HR-SI projekta br. BI-HR/09-10-031 (Nelinearno numeričko modeliranje prostornih armiranobetonskih okvira pod*

utjecajem korozije armature) provođenog uz potporu Ministarstva znanosti obrazovanja i športa Republike Hrvatske i Agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije i projekta iz programa "Stipendije za doktorande" br.03.01/61 (Razvoj konstitutivnog modela za armiranobetonske okvirne nosače pod utjecajem korozije armature) provođenog uz potporu Nacionalne zaklade za znanost, visoko školstvo i tehnologijski razvoj Republike Hrvatske.

9. Literatura

- [1] A. Mihanović, P. Marović, J. Dvornik. *Nelinearni proračuni armirano betonskih konstrukcija*. Društvo hrvatskih građevinskih konstruktora, Zagreb, 1993.
- [2] S. Bratina, M. Saje, I. Planinc. On materially and geometrically non-linear analysis of reinforced concrete planar frames. *International Journal of Solids and Structures*, **41**: 7181-7207, 2004.
- [3] J.L. Bonet, M.L. Romero, P.F. Miguel, M.A. Fernandez. A fast stress integration algorithm for reinforced concrete sections with axial loads and biaxial bending. *Computers and Structures*, **82**: 213-225, 2004.
- [4] D. Zupan, M. Saje. Analytical integration of stress field and tangent material moduli over concrete cross-sections. *Computers and Structures*, **83**: 2368-2380, 2005.
- [5] A. Fafitis. Interaction surfaces of reinforced-concrete sections in biaxial bending. *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No.7, 840-846, 2001.
- [6] J.B.M. Sousa Jr., C.F.D.G. Muniz. Analytical integration of cross section properties for numerical analysis of reinforced concrete, steel and composite frames. *Engineering Structures*, **29**: 618-625, 2007.
- [7] M. Saje, I. Planinc, G. Turk, B. Vratinar. A kinematically exact finite element formulation of planar elastic-plastic frames. *Computers Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **144**: 125-151, 1997.
- [8] I.N. Bronštejn i suradnici. *Matematički priručnik*. Golden Marketing – Tehnička knjiga, Zagreb, 2004.
- [9] M. Saje. *Osnove nelinearne mehanike i Numerične metode v teoriji konstrukcij*. Bilješke s predavanja 2008./09.
- [10] EN 1992-1-1, Eurocode 2: *Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*. CEN, Brussels, 2004.

Usporedba proračunskih konstruktivnih modela na primjeru razuprtog pješačkog mosta “Malonji” u Rijeci

Comparison of Structural Models in the Case of Pedestrian Bridge “Malonji” in Rijeka

Miran Tuhtan, Dragan Ribarić

Sažetak. Na primjeru razuprtog pješačkog mosta “Malonji” preko riječke zaobilaznice napravljena je statička analiza na dva različita konstruktivna modela, radi usporedbe rezultata i njihove interpretacije u pogledu raspodjele unutarnjih sila u karakterističnim presjecima, te progiba.

Most je u konstruktivnom pogledu greda raspona oko 40 m razuprta simetrično kosim stupovima. Greda je sandučastog poprečnog presjeka. Tijekom eksploatacije na gredi su primijećene brojne pukotine te izmjereni progibi veći od očekivanih pa je 2010. godine pristupljeno njenoj sanaciji. Zbog osjetljivosti mosta na velike deformacije zanimljivo je strukturu mosta opisati različitim proračunskim modelima, te usporediti naprezanja koja proizlaze iz tih proračunskih modela.

U tu svrhu konstrukcija mosta opisana je kroz dva različita modela, te proračunata kroz dva različita računalna programa, te su provjereni rezultati na razini reznih sila u karakterističnim presjecima, za jednako ili ekvivalentno opterećenje primjerno navedenim računalnim programima i modelima.

Prvi model je štapni ravninski model izračunat u programu Staad.Pro s dovoljnim brojem štapnih elemenata za potrebe izračuna reznih veličina (momenata savijanja, uzdužnih sila i transverzalnih sila).

Drugi model koristi integrirane elemente sanučastog tipa iz programa RM Bridge u kojem je cijeli presjek jedan element i koji kroz proračun daje rješenja u obliku naprezanja.

Zaključci rada bit će vezani uz rezultate proračuna u smislu pouzdanosti i realnosti pojedinih modela, a za karakteristična djelovanja. U analizu su uključena i neka nelinearna ponašanja, poput skupljanja i puzanja betona ali na pojednostavljeni način u slučaju prvog modela, te u točnijoj formi kroz drugi model.

Ključne riječi: proračunski model, statika linearnih elemenata, metoda konačnih elemenata, pješački most

Abstract. A column supported pedestrian bridge “Malonji” over the tangential highway passing the town of Rijeka is statically analysed using two different structural models. The aim of the analysis is to compare the resultant stresses in particular sections and deformations between the models.

The bridge is 40 m long girder symmetrically supported with two inclined columns and has an elegant hollow section. During its lifetime the structure has suffered of over expected deformations and cracking of the main beam sections, so the analyses presented are useful for predicting the behavior of the structure and designing the reconstruction needed.

Two models are produced by two different computational programs. The linear element model is generated by the “StaadPro” program to calculate the stress resultants (bending moments and internal forces). The second model is produced by the “RM Bridge” program with the hollow section intergrated within a single finite element and giving the stresses as a result of the analysis.

The conclusions have been drawn about reliability and reality of the models for characteristic actions with material nonlinearity included.

Key words: structural modeling, linear element model, finite element model, pedestrian bridge

1. Uvod

U vrijeme projektiranja pješačkog nathodnika Malonji (80-tih godina), projektanti mosta su dokaz nosivost proveli sa tada raspoloživim računalima i metodama, te po tada važećim normama za projektiranje mostova. Danas se modeliranje konstrukcija provodi uz pomoć sofisticiranih računarskih programa, a djelovanja se usvajaju prema mjerodavnim normama a to su hrvatske norme za projektiranje, niza HRN EN 1991 [7, 8, 9] na osnovi kojih slijedi i dokaz nosivosti i upotrebljivosti prema normama HRN EN 1992-2 [10] i HRN EN 1998-2 [11].

Na nathodniku su tokom eksploatacije zamijećeni i izmjereni neočekivano veliki progibi, te je cilj ovog rada ustvrditi da li se te deformacije mogu predvidjeti korištenjem današnjih računalnih modela i programa.

U ovom radu uspoređeni su rezultati dobiveni u dva softvera – *Staad.Pro* (Model 1) i *RM Bridge* (Model 2). Oba softvera su dio *Bentley grupe*, s time da je *Staad.Pro* program za generalne statičke proračune, dok je *RM Bridge* namijenjen isključivo projektiranju mostova. [1]

Rad u navedenim programima ukratko je opisan u 5. poglavlju.

2. Tehnički opis

Pješački nathodnik Malonji nalazi se na km 6+452,00 Riječke zaobilaznice. Objekt je izgrađen 1988. godine.

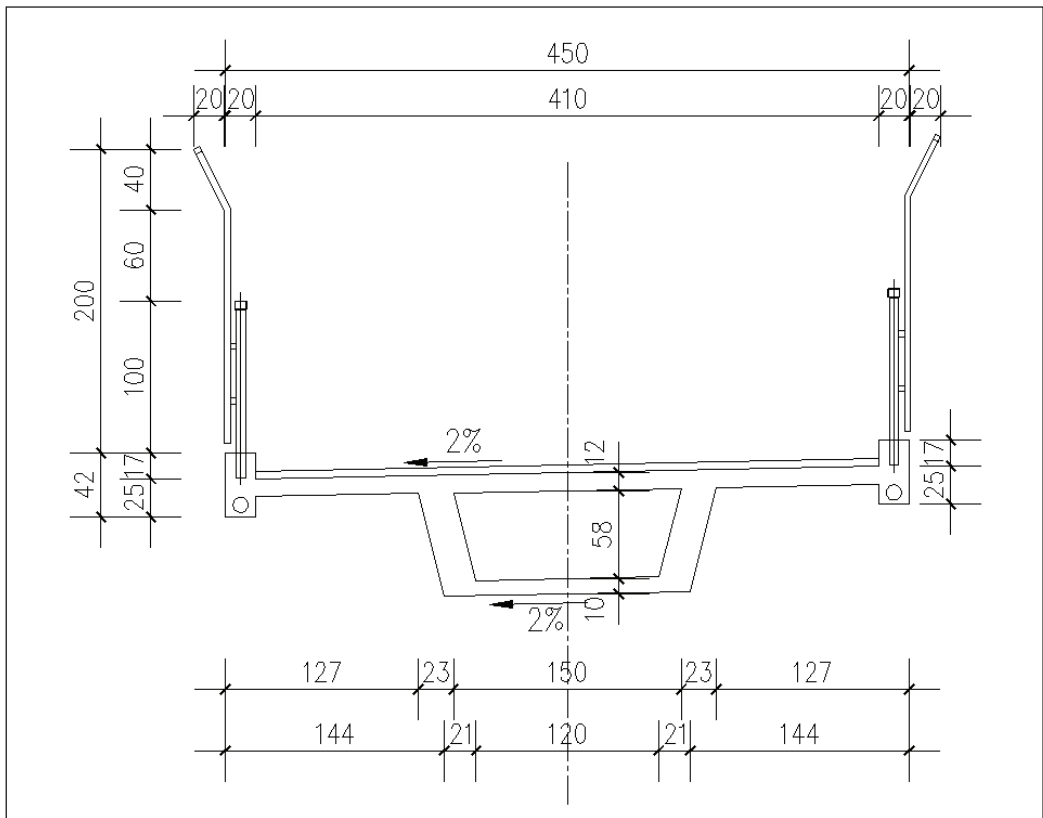
Os mosta sječe os zaobilaznice pod pravim kutem. Nathodnik se nalazi u padu od 3,97 % idući od sjevera prema jugu. Ukupna širina mosta iznosi 4,50 m, sa širinom pješačke staze od 4,10 m. Kao osnovni presjek mosta izabran je sandučasti presjek s jednom ćelijom ukupne visine 80 cm. Poprečni presjek mosta vidljiv je na Slici 2.

Iznad ležajeva rasponske konstrukcije visina sanduka je veća za 40 cm i ukupno iznosi 120 cm, dok se na krajnjim rasponima na obje strane sandučasti presjek mijenja u puni presjek istih vanjskih dimenzija kao na srednjem rasponu.



Slika 1. Fotografija mosta sa zapadne strane

Most je monolitna armiranobetonska konstrukcija statičkog sustava dvostruke razupore s rasponom srednjeg polja od $L = 31,50$ m te zadovoljava uvjete slobodnog profila zaobilaznice sa zahtijevanom visinom od 4,80 m.



Slika 2. Poprečni presjek mosta

Na prijelazu nathodnika u rampu na obje strane, mostovska konstrukcija povezana je vlačnim štapom koji ima zajednički temelj sa stupom mosta.

Most je temeljen plitko, s temeljima tlocrtnne površine 2,0 x 2,4 m, a debljine 1,0 m.

Kosnici su širine 140 cm, a visina im linearno raste od 30 cm na temelju do 53 cm na spoju s glavnim nosačem. Vlačni štapovi su pravokutnog presjeka dimenzija 120 x 30 cm u cijeloj svojoj dužini.

Na udaljenosti od 2,4 m od ležajeva prema sredini raspona nalazi se revizioni otvor dimenzija 60 x 60 cm na donjoj strani sanduka.

3. Izmjerene deformacije mosta

Nakon izgradnje mosta 1988. godine, most je ispitan probnim opterećenjem na srednjem polju rasponske konstrukcije u iznosu od 21,15 kN/m'. Tada su

izmjerene neočekivano velike deformacije, te je zahtjevano kontinuirano praćenje deformacijskih veličina na mostu.

Nakon 17 godina, 2005. godine, ukupno izmjereni progib na sredini raspona konstrukcije, uzimajući u obzir nadvišenje oplata od 4,50 cm, iznosio je 21,00 cm, a za dominantno stalna trajna djelovanja (vlastita težina i “mrtvi” teret). U odnosu na srednji raspon od $L=31.50$ m, izmjereni progib čini $1/150$ dio te dužine (s oduzetim nadvišenjem je to $1/190$ raspona), a što je prevelika vrijednost uspoređujući sa uobičajeno tolerantnih $L/250$ i to s uračunatim prometnim teretima na mostu.

4. Opterećenja

U oba računalna modela usvojena su jednaka opterećenja i djelovanja. Pored vlastite težine konstrukcije, u obzir je uzeto stalno opterećenje od težine betonske ploče mosta te ograde i zaštitne mreže, a težina pješačkog prometa uzeta je kao i prometno opterećenje pješačkog mosta.

Prema Eurokodu EN 1993-2, na mostovima opterećenje snijegom i prometno opterećenje ne mogu djelovati istovremeno. Kako je za danu lokaciju mosta opterećenje snijegom značajno manje od prometnog opterećenja, opterećenje snijegom nije uzeto u obzir kao mjerodavno opterećenje [2].

Kao što se može vidjeti na Slici 3, most je opterećen prometnim opterećenjem na tri različita načina. U prvom slučaju, opterećena je cijela pješačka površina mosta. U drugom slučaju opterećen je samo srednji raspon, dok su u trećem slučaju opterećeni srednji i sjeverni (gornji) raspon.

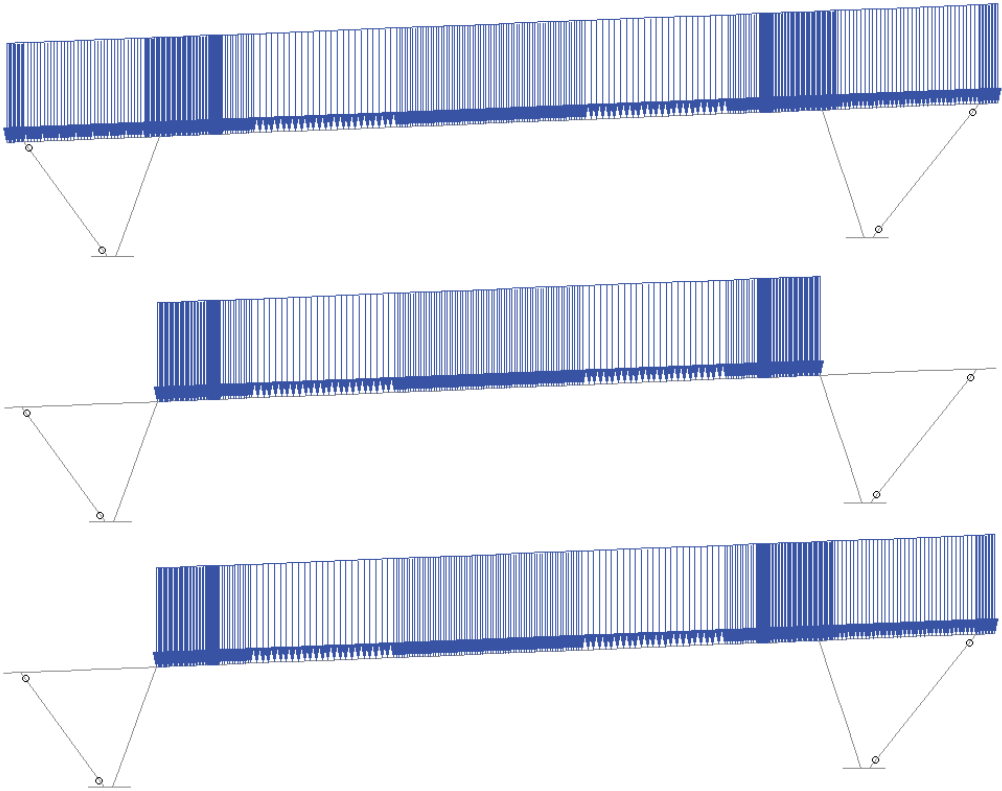
5. Statički proračun

Statički proračun konstrukcije izrađen je u dva *Bentley*-eva softvera, *Staad.Pro* i *RM Bridge*.

5.1. Model 1 (*Staad.Pro*)

Štapni model u Modelu 1 sastoji se od 39 čvorova i 38 štapova. Glavni nosač je podijeljen u 30 štapova, dok su kosi stupovi, zbog njihovog promjenjivog poprečnog presjeka, podijeljeni na tri štapa. Vlačni štapovi su jednakog poprečnog presjeka cijelom svojom dužinom, te su modelirani kao jedan štap.

Sve promjene poprečnih presjeka rasponske konstrukcije su uzete u obzir i unesene su u model.



Slika 3. Tri slučaja raspodjele prometnog opterećenja za nathodnik Malonji

Vlastita težina je definirana kao *Selfweight*, te program sam računa volumne težine štapova na temelju unešenih podataka o geometriji presjeka i vrsti materijala, dok su stalno i prometno opterećenje definirani kao *Uniform Force*. Vrijednost stalnog opterećenja iznosi $-13,5 \text{ kN/m}^2$, a prometnog $-22,5 \text{ kN/m}^2$.

Skupljanje betona je uključeno u model kao jednolika temperaturna promjena od $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, što je ekvivalent za efekt jednolikog skupljanja od $\varepsilon_{cs0} = 0.3 \text{ }‰$ ($\alpha_t = 10^{-5} \text{ } 1/^\circ\text{C}$), a puzanje je uzeto u obzir, ali samo za stalna djelovanja u novom proračunu modelu sa reduciranim modulom elastičnosti ($E_{c,eff} = E_{cm} / (1 + \varphi(t, t_0))$) i za koeficijent puzanja od $\varphi(t, t_0) = 2.4$). Proračun u ovom modelu ne uzima u obzir i stvarno ugrađenu armaturu u presjecima veći samo puni neraspucali presjek.

5.2. Model 2 (RM Bridge)

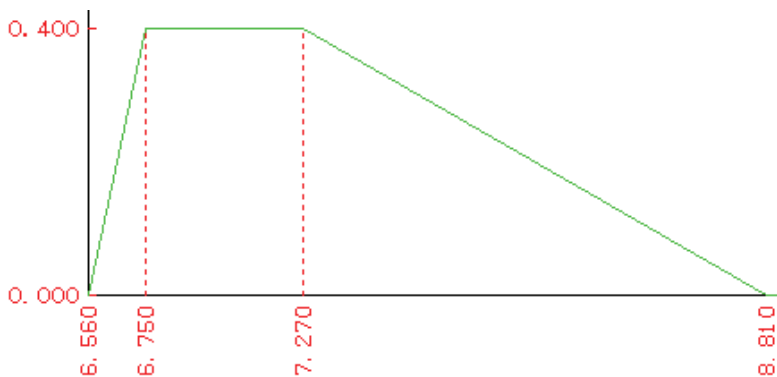
Modeliranje u programskom paketu *RM Bridge (RM)* počinje u *Geometric Pre-processor (GP)*, u kojem se definiraju sve geometrijske značajke objekta. [3]

Nakon što se unese tlocrtni i visinski položaj uzdužne osi, konstruiraju se potrebni poprečni presjeci sa svojim realnim dimenzijama.

Za rasponsku konstrukciju odabrana su dva karakteristična poprečna presjeka. Sandučasti presjek visine 80 cm za srednji raspon te puni presjek iste visine za krajnje raspone.

Revizioni otvor u donjem dijelu sanduka je definiran kao varijabla koja na mjestu otvora ima svoju punu vrijednost, a u ostatku konstrukcije je nula.

Vetikalna vuta u zoni veze sa kosim stupom uzeta je u opis geometrije presjeka nosača povećanjem visine presjeka kao na Slici 4. u odnosu na stacionažu od kraja mosta. Na slici se vidi povećanje visine presjeka za 40 cm, koje je definirano kao varijabla koja između svojih minimalnih i maksimalnih vrijednosti i ima linearnu promjenu, a u zoni prodora stupa ima konstantnu vrijednost. Na x-osi je stacionaža u metrima, dok je na y-osi promjena visine presjeka u metrima ali u uvećanom mjerilu.



Slika 4. Promjena visine presjeka

Kako *RM* i *GP* stupove uvijek smatraju vertikalnima, njihov otklon od vertikale je također bio zadan kao varijabla. [4]

Nakon što je geometrijski model definiran, eksportira se u *RM* u kojem slijedi statički proračun.

Vlastitu težinu konstrukcije dovoljno je definirati kao *Selfweight*, a točni podaci o presjeku dobivaju se iz modela napravljenog u *GP*-u.

Stalno opterećenje je definirano kao *Uniform concentric element load* s vrijednošću od -3 kN/m^2 . Prometno opterećenje ima vrijednost od -5 kN/m^2 . Obje vrijednosti program množi sa zadanom širinom poprečnog presjeka od 4,5 m te tako dobiva ekvivalentne vrijednosti opterećenja kao i u Modelu 1.

Skupljanje i puzanje betona su uključeni u proračun preko funkcije *Creep* za vrijeme od 20 godina [5], [6].

6. Rezultati

Izvršena je statička analiza za opterećenje vlastitom težinom, stalnim opterećenjem i tri slučaja (tri različita položaja) prometnog opterećenja.

Očekivano, drugi slučaj (prometno opterećenje samo na srednjem rasponu) je dao najveće momente u polju i najveće progibe, dok je treći slučaj (prometno opterećenje na srednjem i sjevernom (gornjem) rasponu) dao najveće momente na ležaju iznad sjevernog stupa.

Rezultati za mjerodavna opterećenja prikazani su tabelarno.

U Tablici 1. nalaze se rezultati za momente na najopterećenijem ležaju za karakteristične veličine odgovarajućih djelovanja:

Tablica 1. Momenti na ležaju

	Model 1 [kNm]	Model 2 [kNm]	Razlika [%]
Vlastita težina	2.514,52	2.688,22	6,90
Stalno opterećenje	1.186,21	1.220,65	2,90
Prometno opterećenje	2.085,76	2.107,43	1,04

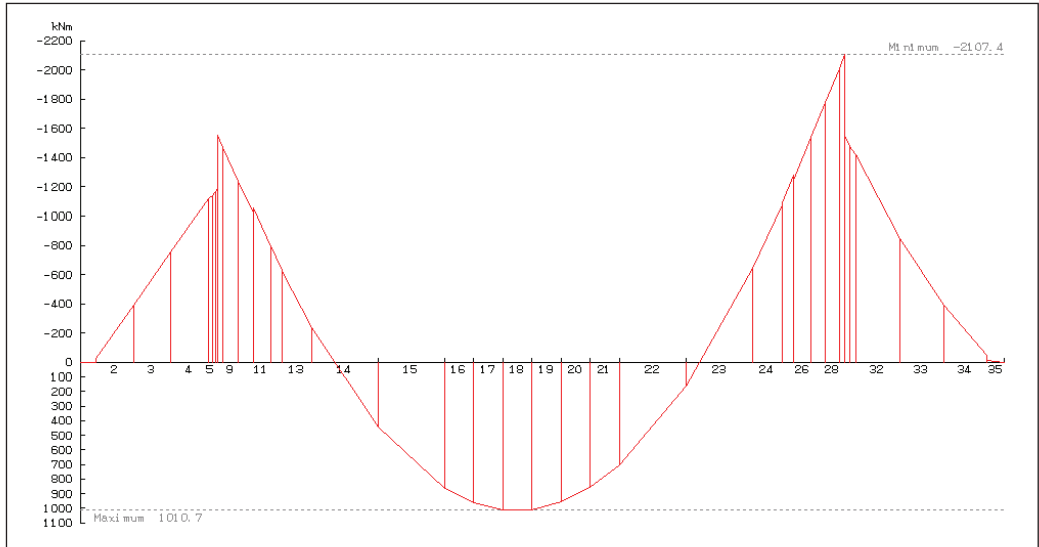
Kod graničnog stanja nosivosti (GSN) za nepovoljna djelovanja, parcijalni koeficijent sigurnosti γ_G iznosi 1,35 te se njime množe vlastita težina i stalno opterećenje. Prometno opterećenje se množi parcijalnim koeficijentom sigurnosti γ_Q koji iznosi 1,50.

Ukupna vrijednost momenta dana je izrazom:

$$M_{uk} = \gamma_G \cdot M_G + \gamma_Q \cdot M_Q \quad (1)$$

Vrijednost ukupnog momenta dobivenog proračunom u Modelu 1, prema (1) iznosi 8.124,63 kNm, dok ta vrijednost prema Modelu 2 iznosi 8.438,12 kNm. Radi se o razlici od 3,86 % između dobivenih rezultata.

Grafički prikaz momenata za prometno opterećenja raspoređeno nad srednjim i sjevernim poljem konstrukcije, dobivenim u *RM-u* dat je na Slici 5:



Slika 5. Momentni dijagram za prometno opterećenje (treći slučaj) u RM-u

U Tablici 2. dani su rezultati za najveće momente u polju za karakteristične veličine odgovarajućih djelovanja:

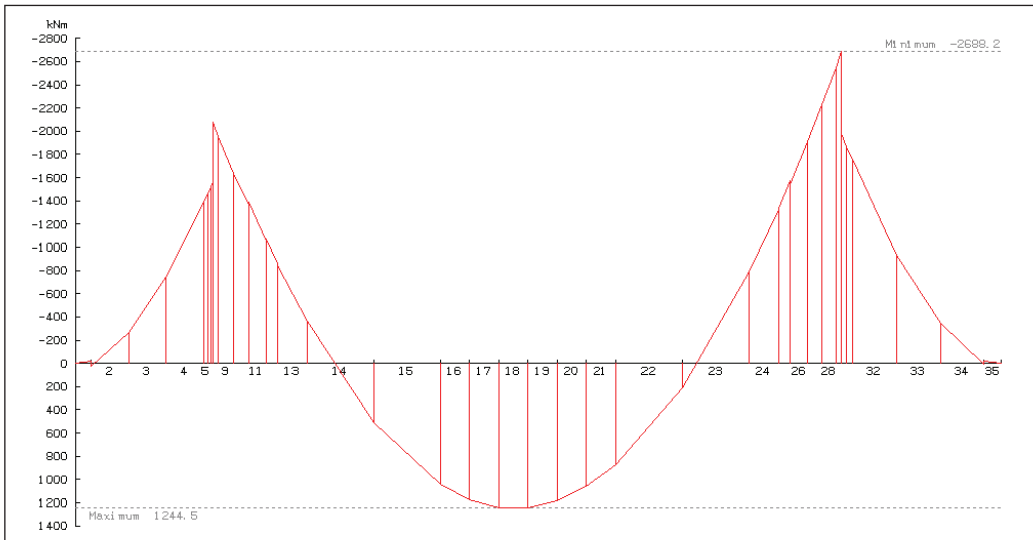
Tablica 2. Momenti u polju

	Model 1 [kNm]	Model 2 [kNm]	Razlika [%]
Vlastita težina	1.220,25	1.244,51	1,99
Stalno opterećenje	609,04	601,19	1,30
Prometno opterećenje	1.028,58	1.015,89	1,28

Analogno izračunu ukupne vrijednosti momenta na ležaju, momenti u polju se također proračunavaju prema (1). Dobivene su slijedeće vrijednosti:

Ukupni moment u polju prema Modelu 1 iznosi 4.012,41 kNm, a prema Modelu 2 4.015,53 kNm. Razlika između te dvije vrijednosti je manja od 0,1 % te je možemo zanemariti.

Na Slici 6. nalazi se prikaz momentnog dijagrama u *RM-u* za vlastitu težinu konstrukcije:



Slika 6. Momentni dijagram u *RM-u* za vlastitu težinu

Vrijednosti najvećih progiba od stalnih djelovanja (uzimajući u obzir efekte puzanja), te od prometnog tereta i nezavisno skupljanja, dati su u Tablici 3:

Tablica 3. Najveći progibi

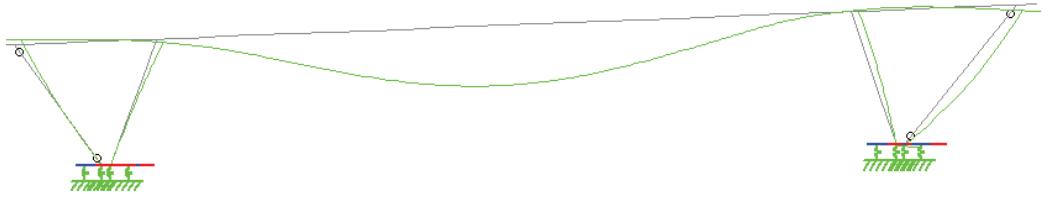
	Model 1 [mm]	Model 2 [mm]	Razlika [%]
Vlastita težina	97,80	109,44	11,90
Stalno opterećenje	48,96	53,03	8,31
Prometno opterećenje	23,35	25,37	8,65
Skupljanje betona	10,61	11,38	7,26

Ukupna vrijednost progiba za granično stanje uporabljivosti (GSU) te koeficijenti sigurnosti za sva opterećenja iznose 1,00.

Prema Modelu 1, ukupni progib iznosi 180,72 mm, dok po proračunu u Modelu 2 ukupni progib iznosi 199,22 mm, što je razlika od značajnih 10,24 %.

Izmjereni progib na konstrukciji iznosio je 210,00 mm. Razlika između rezultata u Modelu 1 i stvarnih rezultata iznosi 13,94%, dok su rezultati u Modelu 2 sličniji izmjerenima te se razlikuju za svega 5,13%.

Progibna linija od vlastite težine za model u *Staad.Pro*-u prikazana je na slici 7:



Slika 7. Progibna linija od vlastite težine konstrukcije

7. Zaključak

Staad.Pro i *RM Bridge*, bez obzira na različite načine modeliranja, daju približno jednake rezultate reznih sila za sve tipove opterećenja te za njihove kombinacije.

Kod proračuna progiba dolazi do većih razlika između dva modela. Vrijednosti dobivene u *RM*-u su značajno veće od onih dobivenih u *Staad.Pro*-u te bolje odgovaraju onima izmjerenima na samoj konstrukciji.

S obzirom na to da je model u *RM*-u rađen sa stvarnim presjecima, možemo ustvrditi da *Staad.Pro* prekonzervativno izračunava progibe te da treba pripaziti kada se njegove vrijednosti progiba uzimaju kao mjerodavne.

Prevelike deformacije armirano betonske konstrukcije nadhodnika Malonji posljedica su izbora konstruktivnog rješenja mosta, a neprecizan proračun uvjerio je projektante u ispravnost njihovog modela. Da je bilo moguće današnje računalne programe koristiti pred 25 godina, veliki progibi na nathodniku Malonji nikoga ne bi iznenadili i korekcijama bilo dimenzija presjeka ili količinom armature ili prednaprežanjem, bi se realiziralo prihvatljivo rješenje prema tadašnjim propisima i sa stanovišta sigirnosti i sa stanovišta uporabivosti.

Za ocjenu ponašanja konstruktivnog modela mosta, mislimo da je provedeni proračun dovoljan dokaz da je izvedena konstrukcija neodgovarajuća i prema tada važećim, pa i prema današnjim kriterijima. Nadvožnjak Malonji je u međuvremenu saniran i ojačan sustavom prednapregnutih karbonskih traka. Model konstrukcije ojačanja izrađen je u “Rijeka-projektu” iz Rijeke, a prikaz modela ojačane konstrukcije, kao i proračun bio bi, također, zanimljiv tehnički izvještaj.

8. Literatura

- [1] Janjić D. *Training Getting Started – RM – DIN*. Technische Datenverarbeitung, Graz, 2006.
- [2] Eurocode 3 – *Design of steel structures – Part 2: Steel Bridges*. EN 1993-2: 2006.
- [3] Janjić D. *Training Getting Started – GP – DIN*. Technische Datenverarbeitung, Graz, 2006.
- [4] Janjić D. *Training Prestressing basic – GP – AASHTO, DIN*. Technische Datenverarbeitung, Graz, 2006.
- [5] Janjić D. *Training Prestressing basic – RM – Part 1: AASHTO, DIN*. Technische Datenverarbeitung, Graz, 2006.
- [6] Janjić D. *Training Prestressing basic – RM – Part 2: DIN*. Technische Datenverarbeitung, Graz, 2006.
- [7] HRN EN 1991-1-1:2008, *Eurokod 1 – Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-1: Opća djelovanja – Prostorne težine, vlastita težina i uporabna opterećenja za zgrade* (EN 1991-1-1:2002)
- [8] HRN EN 1991-1-4:2008, *Eurokod 1 – Djelovanja na konstrukcije – Dio 1-4: Opća djelovanja – Djelovanja vjetra* (EN 1991-1-4:2005)
- [9] HRN EN 1991-2:2008, *Eurokod 1 – Djelovanja na konstrukcije – 2. dio: Prometna opterećenja mostova* (EN 1991-2:2003)
- [10] HRN EN 1992-2:2008, *Eurokod 2 – Projektiranje betonskih konstrukcija – 2. dio: Betonski mostovi – Proračun i pravila oblikovanja pojedinosti* (EN 1992-2:2005+AC:2008)
- [11] HRN EN 1998-2:2008, *Eurokod 8 – Projektiranje konstrukcija otpornih na potres – 2. dio: Mostovi* (EN 1998-2:2005)

Važnost projekta organizacije građenja u pripremi izvođenja građevinskih radova

Significance of Construction Management Plan within Construction Work Preparation

Diana Car-Pušić, Ivan Marović, Ivona Gudac

Sažetak. U ovom radu prikazat će se važnost izrade projekta organizacije građenja (POG) u pripremi izvođenja građevinskih radova. Iako njegova izrada ne predstavlja obvezu prema Zakonu o prostornom uređenju i gradnji, postoji niz razloga zbog kojih je ona preporučljiva, osobito ako je riječ o zahtjevnijim građevinama. U članku se ti razlozi obrazlažu, što je sve potkrijepljeno nizom primjera iz prakse. Projektom organizacije građenja se sustavnim pristupom, definiraju svi organizacijski, tehnološki, ekonomski i upravljački elementi čije pravovremeno utvrđivanje predstavlja vrlo učinkovitu mjeru odgovora mogućim rizicima u gradnji. U radu će se također prikazati metodologija izrade projekta organizacije građenja kao i njegova uobičajena struktura.

Ključne riječi: projekt organizacije građenja, metodologija, sustavni pristup, rizik

Abstract. Significance of Construction management plan (CMP) within construction work preparation will be presented in this paper. Although making CMP does not present an obligation according to Regulation of spatial planning and building, there are number of reasons why it is strongly recommended especially for demanding constructions. Reasons for making CMP will be shown in this paper throughout several case studies. Due to system approach of CMP all organizational, technological, economical and management elements are defined whose early determination presents very effective response to possible risks during construction phase. Construction management plan methodology as well as its usual structure will also be presented in this paper.

Key words: construction management plan, methodology, system approach, risk

1. Uvod

Poznata je činjenica iz proizvodne prakse da kvalitetna priprema rješava pola proizvodnih problema na određenom proizvodu što posebno vrijedi u graditeljskoj proizvodnji s obzirom na posebnosti koje obilježavaju tu proizvodnju [1].

Graditeljski projekt se može opisati kao nerutinski, neponovljivi i jedinstveni poduhvat koji ima zasebne vremenske, financijske i tehničke izvedbene ciljeve. Rizik i neizvjesnost se javljaju u svim graditeljskim projektima te je vrlo važno razlikovati izvore rizika od njihovih posljedica. Bez obzira na njihove uzroke, svi rizici mogu utjecati na ciljeve projekta.

Poznate specifičnosti graditeljske proizvodnje su glavni razlog zašto građenje još ne možemo smatrati industrijom iako su, primjenom modernih metoda građenja, napravljeni znatni koraci k približavanju industrijskoj proizvodnji.

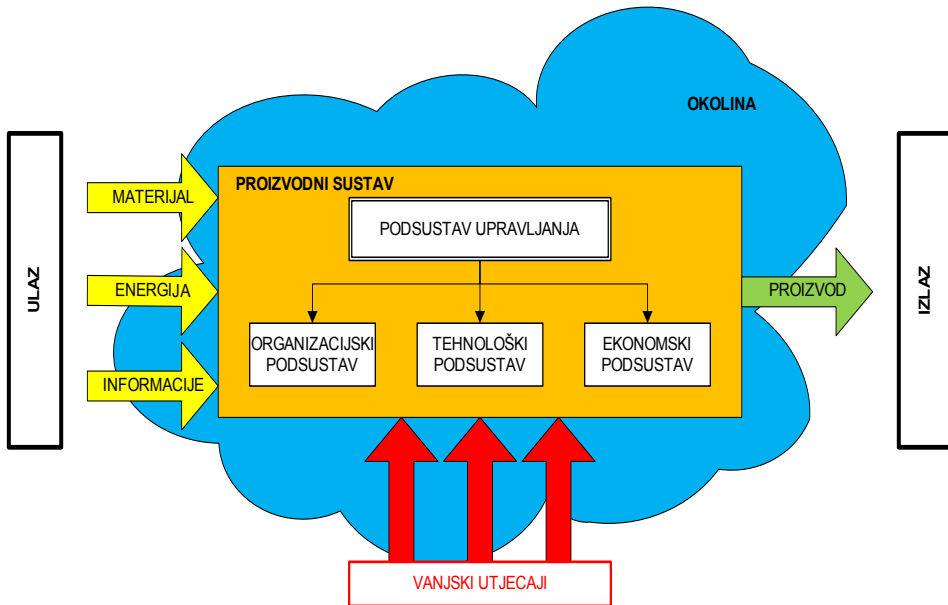
Neke od specifičnosti graditeljske proizvodnje su: statičnost graditeljskog proizvoda, dinamičnost proizvodnih čimbenika, proizvodnja na otvorenom prostoru (najrazličitiji vremenski uvjeti), pojedinačnost proizvodnje, promjenjivost mjesta proizvodnje, veliki opseg i složenost graditeljskih proizvoda, potrebna velika količina različitih repromaterijala te potreban veliki broj radnika različitih struka [1].

Sve navedeno predstavlja nepremostive razloge da se priprema, koja prethodi izvedbi graditeljskog proizvoda, provede na najbolji mogući način što dosljednije i savjesnije jer će to uvjetovati traženu kvalitetu te optimalan odnos vremena i troškova.

Projekt organizacije građenja (POG) upravo treba omogućiti brzo, kvalitetno i ekonomično građenje. Za kvalitetno ostvarivanje tih ciljeva od presudne je važnosti da projekt organizacije građenja bude izrađen, provjeren i usvojen prije početka građenja. Bilo bi poželjno da voditelj budućeg gradilišta sudjeluje u izradi POG-a.

Izvedbu graditeljskog projekta možemo promatrati kao proizvodni sustav i to organizacijski sustav jer ima sva obilježja sustava: postoji određeni cilj koji treba postići, sustav ima međuzavisne sastavnice, nalazi se u okolini u kojoj postoje određena ograničenja. Proizvodni sustav sadrži tri temeljne funkcije: upravljanje, proces rada i nadzor [1].

Na slici 1 prikazana je shema proizvodnog sustava građenja gdje je i prikazana podjela na podsustave. Svaki podsustav je definiran svojim elementima tj. aktivnostima.



Slika 1. Shema proizvodnog sustava

Projekt organizacije građenja, kao ulazna informacija organizacijskog podsustava u proizvodnom sustavu građenja, može se također proučavati i promatrati u sustavnoj koncepciji kao zaseban izdvojen sustav sa svojim podsustavima i elementima. Ta ulazna informacija organizacijskog podsustava čini tehničko-dokumentacijsku osnovu koja služi za definiranje proizvodnih procesa i postupaka tijekom proizvodnog sustava građenja [1].

Kako se objekti ne izvode bez tehničke projektne dokumentacije, ne bi se trebali izvoditi ni bez projekata organizacije građenja. Izvođenje građevinskih radova, pogotovo složenijih građevinskih radova, bez prethodne izrade projekta organizacije građenja, je rad u izrazito rizičnim i neizvjesnim okolnostima.

Na izvođenje građevinskih radova bez prethodno izrađenog projekta organizacije građenja, izvođač se upušta u građenje na temelju iskustva, intuicije i sposobnosti osoblja koje upravlja i rukovodi procesima građenja. Jasno je da se na takav način ne može jamčiti uspješnost izlaza proizvodnog sustava građenja, stoga najčešće izostaje pozitivan poslovni uspjeh u ekonomskim čimbenicima proizvodnje (produktivnost, rentabilnost, ekonomičnost).

Iz navedenog je vidljivo da je za svaki proizvodni sustav potrebno izraditi projekt organizacije građenja kojim će se definirati svi tijekom pravilne transformacije ulaznih parametara u proizvodnom sustavu građenja kako bi se dobili povoljni izlazni parametri sa što manje neujednačenosti.

Donošenjem Zakona o prostornom uređenju i gradnji [2] koji je stupio na snagu 1. listopada 2007. započeta je reforma postojećeg hrvatskog sustava prostornog uređenja i gradnje. Ocijenjeno je da je taj sustav bio primjeren početnoj tranzicijskoj fazi iz koje je Republika Hrvatska izašla te da ga je potrebno mijenjati radi daljnjeg približavanja sustavima država članica Europske unije [3]. Navedena reforma je nastavljena donošenjem Zakona o građevinskim proizvodima [4], a na zakonodavnoj razini treba završiti donošenjem Zakona o arhitektonskim i inženjerskim poslovima i djelatnostima u prostornom uređenju i gradnji [5].

Naime kako navode Bienenfeld i drugi [3], Zakonom o prostornom uređenju i gradnji [2] stavljeni su izvan snage Zakon o gradnji [6] i Zakon o prostornom uređenju [7], ali su ostavljene na snazi odredbe tih zakona kojima se uređuju pitanja obavljanja stručnih poslova prostornog uređenja i pitanja projektiranja, stručnog nadzora građenja i djelatnosti građenja, i to do stupanja na snagu Zakona o arhitektonskim i inženjerskim poslovima i djelatnostima u prostornom uređenju i gradnji [5].

Iako se navedenim zakonima uređuje obavljanje stručnih poslova prostornog uređenja, poslova projektiranja i stručnog nadzora građenja, obavljanje djelatnosti građenja, obavljanje djelatnosti upravljanja projektom gradnje radi osiguranja kvalitetnog, stručnog i odgovornog obavljanja tih poslova i djelatnosti te postizanja drugih ciljeva određenih posebnim propisima kojima se uređuje područje prostornog uređenja, gradnje i građevinskih proizvoda nije definirana potreba izrade projekta organizacije građenja kao cjelovitog dokumenta. Unatoč nepostojanju obvezujućeg akta za izradu projekta organizacije građenja u fazi pripreme izvođenja građevinskih radova ovim radom će se prikazati njegova važnost.

1.1. Pojam projekta i poslovnog sustava

Za bolje shvaćanje što je to projekt organizacije građenja te kako je strukturiran bilo bi dobro definirati što je to projekt sa svim svojim fazama i procesima. Također, treba imati na umu da je građevinarstvo tržišno i projektno orijentirana djelatnost.

U hrvatskom jeziku riječ projekt ima dvojako značenje pri čemu opisuje potpuno različite pojmove. Radujković [8] navodi kako regulativa i praksa pod pojmom projekt podrazumijevaju određenu tehničku dokumentaciju, dok se u novije vrijeme istim pojmom označava i određeni ljudski pothvat u kojem se postižu neki ciljevi.

U anglo-saksonskoj literaturi pojam projekt ima jednoznačno određen smisao:

- Projekt je svaki skup povezanih aktivnosti određenih ciljem, opisima i tehničkim uvjetima koji se moraju izvršiti uporabom resursa u zadanom vremenu uz ograničenu raspoloživost novca za njihova financiranje [9],
- Projekt je vremenski ograničen pothvat poduzet radi stvaranja jedinstvenog proizvoda, usluge ili rezultata [10].

U domaćoj literaturi kojom se koriste građevinari i voditelji projekata projekt se definira:

- kao skup međusobno i u logičkom slijedu povezanih aktivnosti usmjerenih k ostvarenju postavljenih ciljeva, a ograničenog trajanja [11],
- kao svaki jednokratni ljudski pothvat koji ima jasno određen cilj, a izvodi se po fazama unutar zadanog vremena, uz trošenje ili iskorištavanje velikog broja različitih i ograničeno raspoloživih resursa [12].

Iz navedenog proističe da se tijekom odvijanja projekta, bolje reći procesom projekta, rješavaju određeni problemi (slika 2).

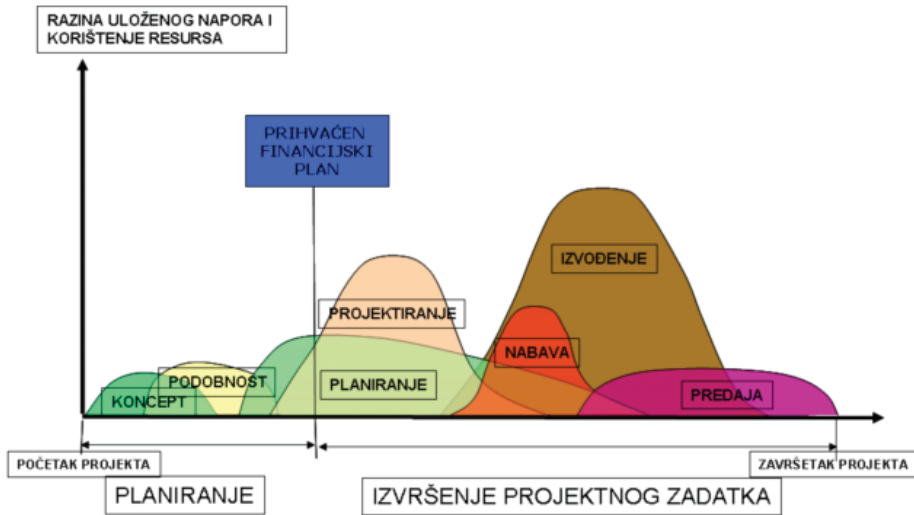


Slika 2. Temeljna shema procesa projekta

Čitav proces nekog projekta se može raščlaniti na tri temeljne faze: koncipiranje, definiranje i izvođenje. Nije nužno da se provedu sve tri navedene faze unutar procesa jednog projekta. Proces može obuhvaćati i samo neku od faza, no tada je potrebno tu fazu raščlaniti na podfaze: koncipiranje, definiranje i izvođenje. Takav proces projekta zovemo projekt u užem smislu [11].

U smislu podjele zadataka, projekte možemo podijeliti na podprojekte, a njih opet na manje zadatke. Svaki zadatak, dio projekta, koji ima svoje vremensko trajanje, određen cilj i angažira neke resurse potrebne za postizanje tog cilja, nazivamo aktivnost [1].

Što se tiče građevinskog projekta, na slici 3 je dan pregled cjelokupnog životnog vijeka građevinskog projekta, od početka do završetka projekta, gdje je uz vrijeme trajanja pojedinih faza prikazana i razina uloženog napora i korištenja resursa.



Slika 3. Cjelokupni životni vijek projekta [13]

Podjela projekta u poslovnom sustavu zavisi od stajališta s kojeg se oni promatraju. Moguća su različita svrstavanja projekata u pojedine skupine, iako nema opće prihvaćene klasifikacije projekata. Ukoliko pogledamo podjelu prema vrsti organizacijskih sustava koju daje Žaja [11], projekti se dijele na:

- Pojedinačne projekte,
- Repetitivne i
- Divergentne projekte.

Također, Žaja [11] prema učestalosti pojavljivanja projekata u sustavima razlikuje:

- Jednokratne projekte (koji se izvode jedanput na isti način) i
- Višekratne projekte (koji se izvode više puta sličnim načinom izvedbe).

Poslovni sustav kojemu je poslovni proces sastavljen uglavnom od višekratnih projekata možemo nazvati projektno usmjerenim poslovnim sustavom. Iako građevinarstvo obiluje projektima i procesima različitog karaktera, jedan takav poslovni proces je zasigurno proces izrade projekta organizacije građenja.

1.2. Primjena sustavne analize na proučavanje projekta

Opća teorija sustava je na području znanstvene metodologije relativno novi pristup u proučavanju prirodnih i društvenih problema. Tvorac opće teorije sustava L. Bertalanffy dao je dvije temeljne odrednice iz tog područja. U prvoj odrednici

navodi da su svi problemi spoznaja u današnjem svijetu problemi dinamičnog uzajamnog djelovanja dijelova sustava koje istražujemo, dok u drugoj razmatra sustave kao otvorene i zatvorene u odnosu na okruženje u kojem se nalaze [1].

Teorija sustava je zapravo teorija modela pa se s tog stajališta ponajprije bavi podjelom modela i proučavanjem njihovih međusobnih odnosa, ali i povezivanjem različitih koncepata proizašlih iz drugih teorija (npr. teorija informacija, teorija organizacije, teorija upravljanja). Glavne odrednice teorije sustava su [1]: rast ili razvoj sustava, elementi sustava, cilj funkcioniranja sustava, proces sustava, entropija sustava, upravljanje sustavom, dinamika sustava, vjerojatnost sustava te načelo ekvifinaliteta.

U okviru opće teorije sustava važno je istaknuti potrebu sustavnog pristupa što označava način mišljenja po kojemu se određeni sustav promatra u sveukupnoj interaktivnoj povezanosti, kako u odnosu prema elementima unutar sustava tako i u odnosu prema većim sustavima kojima on pripada kao podsustav [1].

Sustavni pristup promatranja stvari ili pojava ima ova glavna obilježja:

- Predmet tih pojava (tj. sustav) se promatra kao dio veće cjeline,
- Proučavaju se i definiraju veze s okolinom sustava,
- Definira se funkcija sustava u cjelini,
- Elementi sustava se promatraju u njihovim interakcijama i u odnosu prema funkcioniranju cijelog sustava,
- Uspješnije funkcioniranje sustava traži se u prestrukturiranju elemenata sustava,
- Ponašanje sustava prati se tijekom razdoblja.

Iz navedenog proizlazi da se optimalno funkcioniranje sustava može postići samo usklađivanjem funkcioniranja njegovih dijelova kako bi se ostvario cilj sustava u cjelini, a ne ciljevi njegovih pojedinih dijelova.

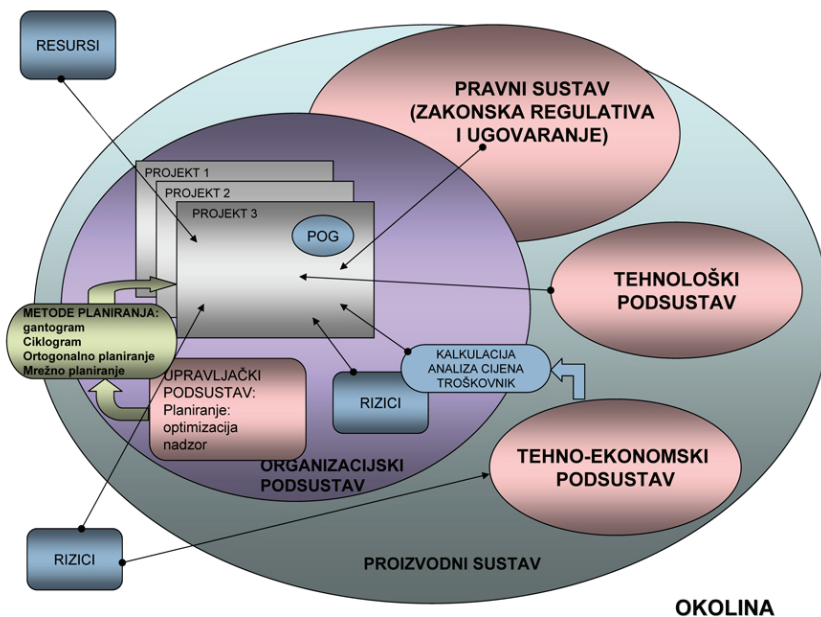
Sustav je osnovni pojam opće teorije sustava. Prije kibernetikog razdoblja sustavom se podrazumijevala materijalna struktura objekta tj. statična povezanost njegovih elemenata. Danas se sustavom podrazumijeva funkcionalna povezanost tih elemenata tj. dinamička povezanost. U najopćenitijem značenju, sustav je suvisla cjelina dok je svaki dio te cjeline određen njome te da je usmjeren ostvarenju određenog cilja.

Izvedbu projekata možemo promatrati kao sustav jer posjeduje sva obilježja koja čine jedan sustav (postoji određeni cilj koji treba postići, postoje međuzavisni podsustavi, postoji okruženje i postoje ograničenja sustava).

Iz činjenice da je izvedba projekata organizacijski sustav proizlazi da u modeliranju i analizi možemo primijeniti sustavni pristup tj.:

- Možemo izraditi model sustava,
- Stanja sustava možemo simulirati,
- Ponašanje sustava možemo analizirati, planirati i pratiti,
- Sustavom se može upravljati,
- Pojedine aktivnosti kao i sustav u cjelini se mogu optimizirati.

Na slici 4 prikazan je proizvodni sustav sa svojim podsustavima unutar okruženja. Također je prikazan položaj projekta organizacije građenja (POG) unutar organizacijskog podsustava sa pripadajućim rizicima i utjecajima ostalih podsustava.



Slika 4. Položaj projekta organizacije građenja unutar proizvodnog sustava

2. Projekt organizacije građenja

2.1. Struktura projekta organizacije građenja

Već smo spomenuli da je projekt organizacije građenja ulazna informacija organizacijskog podsustava u proizvodnom sustavu građenja te da ga se može

proučavati i promatrati u sustavnoj koncepciji kao zaseban izdvojen sustav sa svojim podsustavima i elementima. Njime se nastoje ostvariti ciljevi koje određuju naručitelji radova, izvođačke organizacije i/ili društvo.

Projektom organizacije građenja je potrebno skup aktivnosti s različitim informacijama, na različitim mjestima i u određenom vremenskom redoslijedu usmjeriti na izgradnju građevinskog objekta, što u suštini predstavlja organizaciju građenja. Vrlo je važno projekt organizacije građenja uskladiti sa specifičnostima gradilišta, objekata i okoline u kojoj se odvija izvođenje građevinskih radova.

Cjelokupan rad, od zamisli do završetka građevinskog objekta, mora biti dobro organiziran, planiran i nadziran. Da bi se cjelokupni proces izvođenja građevinskih radova odvijao sa što manje smetnji i zastoja zaslužan je dobro izrađen projekt organizacije građenja koji daje prikaz funkcioniranja sustava s odgovorima što i kako graditi, dinamiku prijelaza iz jednog stanja u drugo, pravila upravljanja i prijedlog odluka.

Da bi se moglo pristupiti izradi projekta organizacije građenja potrebno je posjedovati tehničku dokumentaciju, informacije o raspoloživim operativnim sredstvima, podatke o lokalnim prilikama i terenskim uvjetima te količine radova.

Projekt organizacije građenja nema svoju unificiranu strukturu, no njime se rješavaju svi tehnološki procesi, organizacijski ustroj i rukovođenje, vanjski i unutrašnji transporti, pripremni i prethodni radovi, sheme uređenja gradilišta po fazama izvođenja radova, izvorišta materijala i dobavljači, smještaj i prehrana radnika, vremensko i financijsko planiranje radova, potrebe u resursima, tijekom informacija te praćenje i kontrola radova, plan i kontrola troškova, mjere zaštite na radu, način obračuna i stimulacija, način nadzora proizvodnje te plan potrebnih novčanih sredstava [1].

Projekt organizacije građenja se izrađuje u dvije faze: idejni i izvedbeni ili glavni projekt organizacije građenja. Idejnim projektom organizacije građenja se trebaju utvrditi temeljne sastavnice koje će služiti kao dokumentacijska osnova za sastavljanje ponude za tržište, dok se izvedbeni projekt organizacije građenja izrađuje nakon što je na tržištu dobiven posao izvođenja građevinskih radova.

Na temelju idejnog projekta organizacije građenja, pri izradi izvedbenog projekta organizacije građenja treba primjenjivati načela racionalizacije kako bi se stvorili uvjeti za postizanje što uspješnije proizvodnosti i što povoljnijih izlaznih veličina u proizvodnom sustavu građenja. U tablici 1 prikazani su osnovni elementi koje idejni, a koje izvedbeni, projekt organizacije građenja treba obuhvatiti.

Tablica 1. *Elementi koje idejni/izvedbeni projekt organizacije građenja treba obuhvatiti*

	Idejni POG	Izvedbeni POG
Elementi koje treba obuhvatiti	<ul style="list-style-type: none"> • Prikupljanje i analiza podloga, • Analizu uvjeta građenja, • Temeljnu tehnološku koncepciju građenja, • Temeljnu organizacijsku koncepciju građenja, • Idejnu shemu gradilišta, • Veličine putova unutarnjeg transporta, • Glavne strojeve za proces građenja, • Veličinu kalkulativnog faktora, • Idejni vremenski plan tijeka građenja, • Izradu kalkulacije. 	<ul style="list-style-type: none"> • Definiranje organizacijskog modela građenja po fazama i dijelovima objekta, • Rješenje tehnologije izvedbe za sve vrste građevinskih radova, • Izvedbena shema uređenja gradilišta po fazama izvođenja, s gradilišnim instalacijama i gradilišnim prometnicama, • Opskrba energijom, vodom i drugo, s dimenzioniranjem potreba po energentima, • Rješenje unutarnjeg transporta, • Odabir strojeva s dimenzioniranjem njihovih kapaciteta, • Razmještaj postrojenja, pogona, skladišta i drugo s dimenzioniranjem potrebnog prostora, • Plan materijala s utvrđivanjem izvorišta nabave, • Dimenzioniranje transporta glavnih repromaterijala i montažnih elemenata, • Plan potreba radnika po broju, zanimanju i klasifikacijskoj strukturi, • Dinamičko vremensko planiranje tijeka izvedbe radova u ukupnom trajanju i operativno planiranje u manjim vremenskim veličinama, • Dinamičko planiranje potrebnih resursa, • Financijski dinamički plan, • Smještaj i prehrana radnika, • Upravljanje projektima, • Način obračuna i obračun, • Mjere zaštite na radu, • Mjere zaštite okoline, • Optimalizacija projekta organizacije građenja kroz varijantna rješenja.

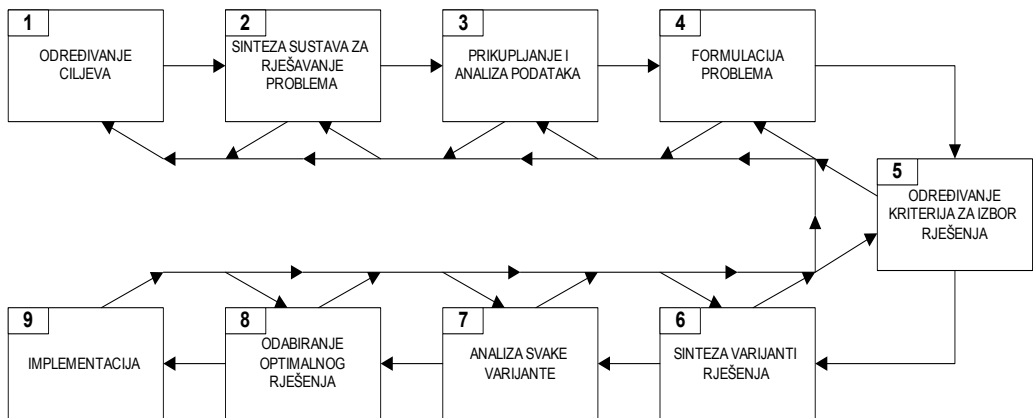
2.2. Metodologija izrade projekta organizacije građenja

Građenje objekta je složen zadatak što povlači za sobom da je i izrada projekta organizacije građenja složena. Složenost izrade POG-a je veća što je objekt koji se gradi veći. Usprkos brojnim elementima i odgovorima na nepoznanice koje projekt organizacije građenja mora dati, sama njegova izrada se treba izvoditi sustavno i metodološki postupno. Zbog navedenih karakteristika građevinskog projekta

(nerutinski, neponovljivi, jedinstveni poduhvat), projekt organizacije građenja tj. određeni dijelovi projekta su podložni promjenama u svrhu zadovoljavanja zadanih projektnih ciljeva (da se radovi izvedu sa što manje smetnji i zastoja).

Projekt organizacije građenja mora zasebno odgovoriti na svaki graditeljski projekt. Na slici 5 je prikazana shema postupka izrade projekta organizacije građenja. Prikazanih devet koraka/faza u postupku izrade projekta organizacije građenja provode se do početka građenja objekta.

Izrada projekta organizacije građenja je iterativan postupak. Svaki korak u postupku izrade projekta organizacije građenja mora imati mogućnost povratnog djelovanja tj. povratnu vezu. Ako prethodno rješenje problema nije primjereno glede veličine vremena, odabrane tehnologije, kapaciteta i/ili troškova, odnosno nekih drugih parametara, povratna veza omogućava intervenciju s ciljem i željom da se postigne najprimjerenije, optimalno rješenje.



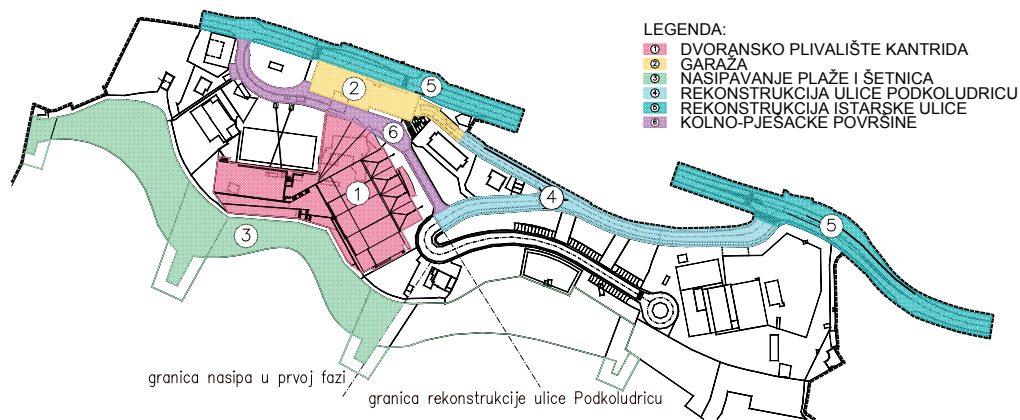
Slika 5. Shema izrade projekta organizacije građenja [14]

3. Primjeri projekta organizacije građenja

3.1. Kompleks dvoranskog plivališta Kantrida

Bazenski kompleks Kantrida veliki je sportsko-rekreacijski plivački kompleks, jedan od najmodernijih i najsofisticiranijih centara vodenih sportova u Europi. Kompleks se prostire na 20.000 četvornih metara s ukupnom vrijednosti investicije od 235 milijuna kuna. Naručitelj projekta je Grad Rijeka. Idejni projekt je izradio studio “Zoppini” iz Milana, a glavni i izvedbeni projekt izradila je varaždinska tvrtka Coning d.d.. Javnim natječajem izabrana je zajednička ponuda STRABAG d.o.o., Zagreb; STRABAG AG – Spittal/Drau, Austrija; i GP Krk d.d., Krk [15, 16].

Projekt je podijeljen u pet faza izgradnje [15]: energana kao početna faza izgradnje, garaža, Dvoransko plivalište Kantrida s pratećim objektima te četvrta i peta faza koje uključuju ugradnju sportske elektronike i sve potrebne opreme, izgradnju PRESS centra za novinare, bazena za skokove i malog bazena za zagrijavanje uz njega, ugradnju opreme za kogeneraciju (istovremenu proizvodnju električne i toplinske energije), rekonstrukciju postojećeg bazena, dio plažnog pojasa između same plaže i objekata te rekonstrukciju vodovoda i vodospreme Kantrida na Zametu.



Slika 6. Prikaz 3. faze izvođenja radova na bazenskom kompleksu Kantrida [15]

Zbog navedene veličine cjelokupnog projekta izgradnje bazenskog kompleksa Kantrida u radu se promatra samo treća faza izgradnje (slika 6). Treća faza izgradnje obuhvaća dvoransko plivalište koje predstavlja centralni objekt, sadrži tri bazena – novi olimpijski bazen s gledalištem na tribinama od 1200 mjesta i dva manja bazena za školu plivanja i pripremu sportaša, i prateće prostorije sportsko-rekreativnog centra, što predstavlja izuzetno složeni graditeljski poduhvat. Neto površina objekta iznosi oko 12.000 četvornih metara [17].

Okosnica projekta organizacije i tehnologije bila je kako istodobno zadovoljiti kvalitetu izgradnje i pritom zadržati u najvećoj mogućoj mjeri udobnost korištenja postojećeg bazena i pratećih objekata za sportaše i građane. Gradilište je za potrebu izrade projekta organizacije i tehnologije bilo podijeljeno u šest cjelina u zahvatu. Elementi navedenih šest cjelina zahvata bazenskog kompleksa Kantrida prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. *Dijelovi 3. faze POG-a bazenskog kompleksa Kantrida*

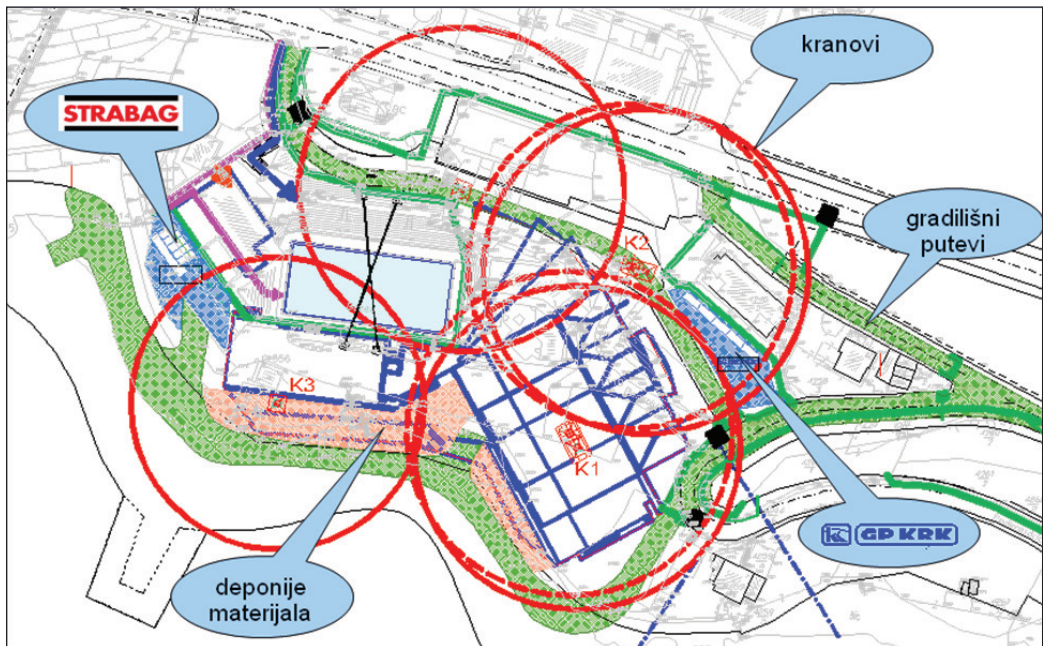
Cjelina 1	A dio – novi olimpijski bazen s pomičnim krovom; B dio – ulazni atrij; D dio – bazen za zagrijavanje i manji bazen za školu plivanja
Cjelina 2	Objekt garaže (nije obuhvaćen projektom organizacije građenja, ali je naznačena radi bolje prostorne i vremenske organizacije dvaju gradilišta)
Cjelina 3	Područje na kojem je planirano nasipavanje plaže te izgradnja nove šetnice
Cjelina 4 i 5	Rekonstrukciju ulice Podkoludrica i Istarske ulice (istočni dio i zapadni dio)
Cjelina 6	Rekonstrukcije i građenje novih kolno-pješačkih površina, staza i stubišta

Kompleks se nalazi na zahtjevnoj lokaciji, uskoj parceli omeđenoj gradskom prometnicom s jedne i morem s druge strane. Lokalne prilike i uvjeti određuju mogućnosti organizacije sustava vanjskog i unutarnjeg transporta. Za cestovnu komunikaciju na glavnu prometnicu, odnosno Istarsku ulicu bila su predviđena dva, odnosno tri ulaza-izlaza, glavni i pomoćni. Glavni ulaz na gradilište bio je promjenjiv, s obzirom na izvođenje radova u ulici Podkoludrica. U prvoj fazi ulaz je bio na istočnom križanju s Istarskom ulicom, a u drugoj fazi ulaz je bio na zapadnom križanju s Istarskom ulicom. Unutarnji transport odvijao se po gradilišnim putovima koji su se protezali sa južne strane glavnog objekta, po plaži te između objekta i garaže. Cijelo gradilište je funkcioniralo za vrijeme izvedbe rekonstrukcija navedenih pristupnih ulica i raskrižja, čiji je završetak predstavljao zadnje faze izvođenja radova na kompleksu Kantrida. S obzirom na ograničenje raspoloživog prostora gradilišta, a uvažavajući uobičajene postupke građenja, na gradilištu nije bilo smještaja većih gradilišnih pogona.

U građevinskoj praksi uobičajeno je da se proizvodnja betona, izrada armature i oplata provodi u centralnim pogonima. U široj okolici gradilišta, na području grada Rijeke, nalaze se odgovarajući opskrbeni centri za nabavu svih navedenih materijala potrebnih za izradu konstrukcije. Na gradilištu su bili smješteni samo manji pokretni tesarski pogoni, a armatura se dovozila savijena iz centralnog armiračkog pogona. Opskrba betonom organizirala se sa betonare GP Krk na Kukuljanovu. Izrada, doprema i dobava montažnih elemenata (čeličnih krovnih rešetki, tribina) organizirala se u dogovoru s izabranim podizvođačem. Gradilište “Dvoransko plivalište Kantrida” s pratećim objektima se nalazi u urbanom dijelu stoga se opskrba gradilišta vodom i strujom obavljala priključenjem na gradsku vodoopskrbnu i električnu mrežu uz prethodno dobivene dozvole od nadležnih institucija.

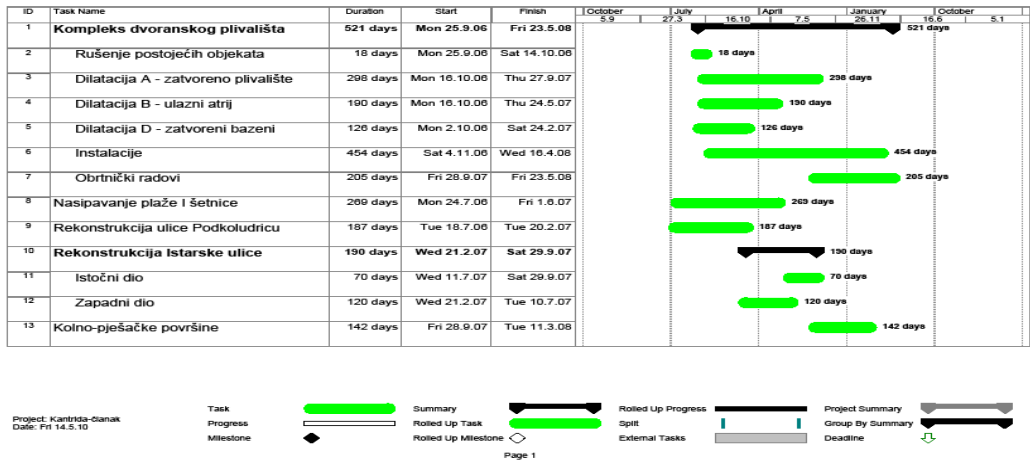
Unutarnji transport materijala obavljao se pomoću dvije 50-metarske toranjske dizalice smještene prema shemi gradilišta prikazanoj na slici 7. Za nepokriveni

dio objekta koristila se 50-metarska toranjska dizalica sa susjednog gradilišta garaže. Pri izgradnji dilatacije D koristila se dodatna 25-metarska dizalica koju je bilo moguće pomaknuti na drugi položaj prema napredovanju izgradnje te dilatacije. Privremene građevine za upravu gradilišta (kontejneri) smjestile su se na platoima označenim na shemi gradilišta (posebno za obje izvođačke tvrtke). Posebno se pazilo na mjere zaštite vanjskih korisnika i osiguravanje zaštićenih pristupnih puteva za korisnike postojećeg bazena i restorana u neposrednoj blizini gradilišta [15].



Slika 7. Shema unutarnjeg transporta materijala na gradilištu [15]

Zbog Europskog prvenstva u plivanju u kratkim bazenima, koje se održavalo od 11.-14. prosinca 2008., vrijeme izvođenja radova bilo je iznimno kratko s obzirom na složenost i jedinstvenost projekta. Medijski pritisak dodatno je otežao pristup organizacijskom, odnosno vremenskom tijeku građenja dvoranskog kompleksa. Na slici 8 prikazan je pojednostavljeni vremenski plan (gantogram) spomenutih šest cjelina u zahvatu.



Slika 8. Pojednostavljeni vremenski plan izgradnje 3. faze

Za vrijeme izvođenja treće faze radova, Dvoransko plivalište Kantrida s pratećim objektima, nužno je bilo osigurati neometano izvođenje aktivnosti na postojećem bazenu. Izvedba privremenih klupskih prostorija je bila jedan od bitnih preduvjeta za neometani rad plivačkog kluba. Radovi su započeli [15], 25.09.2006., s rušenjem postojećih klupskih prostorija na prostoru buduće dilatacije B. Tek s dovršetkom rušenja klupskih prostorija, 14.10.2006., omogućeno je izvođenje radova na dilataciji B.

S početkom radova na dilataciji B započeti su i radovi na dilataciji A tj. na novom olimpijskom bazenu s pomičnim krovom. Dovršetak radova bio je planiran za kraj rujna 2007. godine što je predstavljalo izvođenje pomične krovne konstrukcije koja prekriva obje dilatacije. Redoslijed i trajanje montaže čelične krovne konstrukcije bilo je definirano planom izvođača konstrukcije u trajanju od 13,5 tjedana na dilataciji A i trajanju od 3,5 tjedana na dilataciji B.

Početak radova na montaži krovne konstrukcije na dilataciji A uvjetovan je bio izvedbom i očvršćivanjem nosivih kosih armiranobetonskih stupova i horizontalnog grednog nosača. Montaža na dilataciji A slijedila je iza montaže na dilataciji B na kojoj ranije završava armiranobetonska konstrukcija.

Montaža krovne konstrukcije izvedena je auto-dizalicom nosivosti 120 tona koja je bila smještena u prostoru današnje školjke bazena. Upravo njen rad tj. završetak montaže krovne konstrukcije utjecao je na izvedbu dna bazena i južnog vanjskog zida što je predstavljalo kritičnu fazu u cjelokupnom projektu izgradnje kompleksa dvoranskog plivališta Kantrida.

Rekonstrukcija cesta bile su od izuzetne važnosti za gradilište, jer su one služile kao osnovne prilazne ceste gradilištu i kao osnovni pravci unutar samog

gradilišta. Prema priloženom vremenskom planu (slika 8) konstrukcija ulice Podkoludrica s pratećom infrastrukturom završila je 20.02.2007, što je bilo vezano na početak rekonstrukcije spoja s Istarskom ulicom II dio s rokom završetka 10.07.2007. Do 29.09.2007 dovršila se rekonstrukcija spoja s Istarskom ulicom I dio. Radovi na nasipavanju plažnog pojasa i izradi gradilišnog puta odvijali su se kontinuirano od 24.07.2006. do 01.06.2007. godine. Rok [15] za dovršenje radova prema zahtjevima investitora bio je 30.06.2008. godine.

3.2. Školska sportska dvorana pri Područnoj školi Dubašnica

Školska sportska dvorana je građevina polivalentne namjene za potrebe sportskih, društvenih i kulturnih aktivnosti općine Dubašnica. Površine je 2.073 kvadratnih metara, ukupne vrijednosti investicije od oko 15 milijuna kuna. Naručitelj projekta je Općina Dubašnica, a izvođač, izabran putem javnog natječaja, GPP Mikić d.o.o. iz Omišlja [18].

Objekt sadrži dvoranski prostor sportske namjene, garderobno-sanitarne prostore, spremišta, prostor termotehničkih instalacija, toplu vezu (hodnik) između škole i dvorane te kuhinju i blagovaonicu. Dvorana je razmjerno malih gabarita, već viđenog sustava gradnje, stoga ne predstavlja problem u projektiranju organizacije i tehnologije građenja. Često se u praksi za jednostavnije projekte ne izrađuje projekt organizacije građenja u cijelosti već samo neki osnovni elementi, poput vremenskog i financijskog plana, uz provođenje prethodnih istraživanja na budućoj lokaciji gradnje.

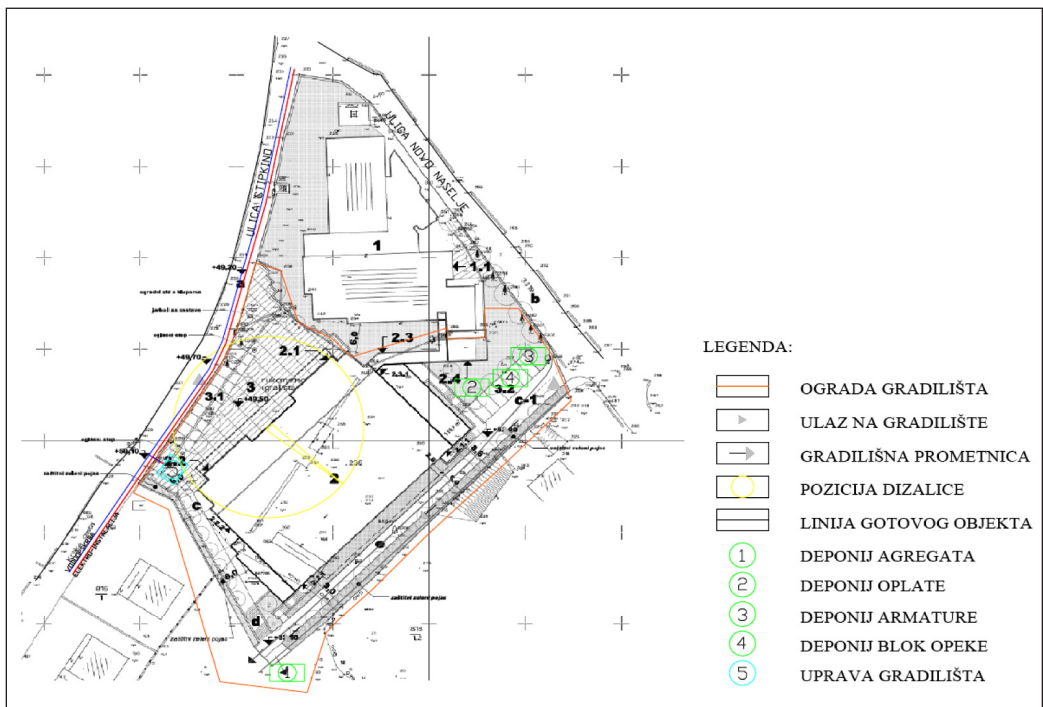
Konstrukcija građevine sklop je klasično građenih i prefabriciranih konstruktivnih elemenata: monolitni betonski i armirano-betonski temeljni sustav, sustav nosivih zidova od armiranog-betona i opeke, armirano-betonskih i čeličnih stupova, tipskih – prefabriciranih krovnih nosača dvorane od lameliranog drva, armirano-betonskih ploča tribina i stubišta te pokrova od termoizolirajućih kompozitnih aluminijskih panela [18].

Prije početka izrade projekta organizacije građenja, izvršen je obilazak terena te potrebne prethodne istražne radnje radi utvrđivanja svih utjecaja na izgradnju “Školske sportske dvorane”. Gradilištu se moglo pristupiti lokalnim ulicama sa sjeverne i istočne strane, koje su u dobrom stanju. S obzirom na ograničenje raspoloživog prostora gradilišta, na gradilištu nije bilo smještaja većih gradilišnih pogona. Unaprijed savijena armatura dovozila se iz armiračnice izvođača u neposrednoj blizini gradilišta dok se gotov beton dovezio s betonare Tiha d.o.o. u Šilu.

Izrada i doprema montažnih elemenata (lamelirane krovne konstrukcije) organizirala se u dogovoru s podizvođačem iz Austrije. Tehnologija postavljanja

krovne konstrukcije predstavljala je glavni problem u izgradnji školske sportske dvorane. Predgotovljeni krovni nosači, raspona 23 metra, predstavljali su određene probleme kako u transportu do gradilišta tako i pri samoj ugradnji. Zbog veličine nosača, da bi se iste moglo postaviti na armirano-betonske grede i stupove dvorane, bilo je potrebno doći auto-dizalicom na točno mjesto ugradnje. To je zahtijevalo određeni pristupni prostor unutar samog objekta. Zbog navedene potrebe pristupa, istočna strana objekta nije u potpunosti izvedena do projektirane visine. Nakon izvedene krovne konstrukcije prionulo se dovršetku vanjskog zida objekta.

Opskrba gradilišta vodom i strujom obavljala se priključenjem na gradsku vodoopskrbnu i električnu mrežu uz prethodno dobivene dozvole od nadležnih institucija. Unutarnji transport materijala obavljao se pomoću auto-dizalice smještene prema shemi gradilišta prikazanoj na slici 9.



Slika 9. Shema organizacije gradilišta školske dvorane Dubašnica [18]

Vrijeme izvođenja radova određeno je dinamičkim planom, koji sadrži i pomoćnu tablicu u kojoj su iskazane količine, izvršitelji radova, normativi te trajanje aktivnosti. Vremenski rok izgradnje školske sportske dvorane Općine Dubašnica određen je od strane investitora i nije ovisio o predstojećim natjecanjima i događanjima u dvorani. Sveukupno trajanje radova trajalo je 24 mjeseca, od listopada 2006. do listopada 2008. godine [18].

4. Zaključak

Projekt organizacije građenja ulazna je informacija organizacijskog podsustava u proizvodnom sustavu građenja te ga se može proučavati kao zaseban izdvojen sustav sa svojim podsustavima i elementima. Njime se nastoje ostvariti ciljevi koje određuju naručitelji radova, izvođačke organizacije ili društvo u cjelini.

Iako njegova izrada nije obvezna temeljem pozitivne zakonske regulative, teorija i stručna praksa uvjerljivo upućuju na potrebu njegove izrade, osobito kod zahtjevnijih objekata. Mnogi su izvoditelji i izvođači prepoznali značaj izrade POG-a, te ga redovito izrađuju u fazi pripreme za gradnju.

Projektom organizacije građenja potrebno je skup aktivnosti s različitim informacijama, na različitim mjestima i u određenom vremenskom redosljedu usmjeriti na izgradnju građevinskog objekta, što u suštini predstavlja organizaciju građenja. Vrlo je važno uvažiti specifičnosti objekta i lokacije gradilišta te projekt organizacije građenja uskladiti s tim specifičnostima, čime će se na optimalan način odgovoriti mogućim rizicima na gradilištu.

Pri samom projektiranju organizacije potrebno je rukovoditi se načelima racionalizacije građevinske proizvodnje.

Upravo uvažavajući specifičnosti objekta i gradilišta, te rukovodeći se mjerama racionalizacije pri projektiranju, bit će postignut osnovni cilj POG-a, a to je ekonomično građenje u optimalnom roku uz postizavanje tražene kvalitete objekta.

5. Literatura

- [1] R. Lončarić. *Organizacija izvedbe graditeljskih projekata*, Sveučilište u Zagrebu i HDGI, Zagreb, 1995.
- [2] Zakon o prostornom uređenju i gradnji, Narodne novine br. 76/07, 38/09
- [3] J. Bienenfeld, L. Fučić, D. Mrduljaš, D. Rajčić. *Aktualnosti građevinsko-tehničke regulative*. Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb, 2009.
- [4] Zakon o građevinskim proizvodima, Narodne novine br. 86/08
- [5] Zakon o arhitektonskim i inženjerskim poslovima i djelatnostima u prostornom uređenju i gradnji, Narodne novine br. 152/08
- [6] Zakon o gradnji, Narodne novine br.175/03, 100/04
- [7] Zakon o prostornom uređenju, Narodne novine br. 30/94, 68/98, 61/00, 32/02, 100/04
- [8] M. Radujković. Voditelj projekta. *Građevinar*, 52(3): 143-151, 2000.

- [9] H. Kerzner. *Project Management*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.
- [10] PMI. *Project Management Body of Knowledge*, Project Management Institute, Upper Darby PA USA, 1998.
- [11] M. Žaja. *Poslovni sustav*, Školska knjiga, Zagreb, 1993.
- [12] M. Radujković. *Upravljanje resursima i rizikom kod građevinskih projekata*, znanstveni projekt M2 i T082005, 1996-1999.
- [13] H.N. Ahuja, S.P. Dozzi, S.M. AbouRizk. *Project management: techniques in planning and controlling construction projects*, John Wiley & Sons, Inc. 1994.
- [14] J. Klepac. *Organizacija građenja*, Građevinski institut, Fakultet građevinskih znanosti, Zagreb, 1988.
- [15] D. Car-Pušić, N. Turina. *Projekt tehnologije i organizacije građenja*, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, 2006.
- [16] Ured Grada Rijeke. *Izgradnja kompleksa bazena na Kantridi*, 2008., <http://www.rijeka.hr/KompleksBazenaNa>, pristupljeno: 27.04.2010.
- [17] N. Turina. *Organizacijski modeli povezivanja faza i sudionika u građevinskim projektima*, magistarski znanstveni rad, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2008.
- [18] I. Gudac. *Izrada projekta organizacije i tehnologije građenja za objekt "Školska sportska dvorana pri područnoj osnovnoj školi u Dubašnici"*, diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka, 2009.

Pregled novijih kolničkih konstrukcija koje ublažavaju efekt urbanih toplinskih otoka

Overview of Recent Pavement Structures to Mitigate the Urban Heat Island Effect

Marijana Cuculić, Sanja Šurdonja

Sažetak. Lokacija i struktura gradova, kao i okoliš koji je na tom mjestu postojao, važni su okolišni čimbenici koji imaju utjecaj na globalno zatopljenje. Razlika u toplini između grada i njegove okoline ovisi o tome koliki je postotak tla prekriven vegetacijom, a razumijevanje procesa urbanog zagrijavanja biti će važno za gradnju novih i modernizaciju postojećih gradova.

Gradske površine ubrzavaju procese odvodnje vode, čime umanjuju prirodni efekt hlađenja koji voda ima na krajolik. Kolnici izgrađeni od tamnih materijala apsorbiraju više sunčeve energije što za posljedicu ima zagrijavanje samog kolnika i okolnog zraka što značajno doprinosi efektu urbanih toplinskih otoka.

Efekti toplinskih otoka mogu se ublažiti upotrebom materijala kolnika koji reflektiraju dolazno sunčevo zračenje, povećavaju isparavanje te ostaju hladniji od konvencionalnih materijala.

Cilj rada je dati pregled novijih struktura kolničkih konstrukcija koje ublažavaju efekt urbanih toplinskih otoka. Usporedbom s konvencionalnim kolničkim konstrukcijama prikazati će se prednosti korištenja novijih struktura i materijala kolnika.

Ključne riječi: kolnička konstrukcija, urbani toplinski otok, albedo

Abstract. Location and structure of cities and the environment that exist at that location, are important environmental factors that have an impact on global warming. The difference in heat between the city and its environment depends on what percentage of soil is covered with vegetation, and understanding of urban warming will be important to build new and modernize existing cities.

A city accelerates surface drainage, thus reducing the natural cooling effect that water has on the landscape. The pavements made of dark materials absorb more

solar energy, which results in warming the roadway and the surrounding air, which contributes significantly to the urban heat island effect.

The heat island effects can be mitigated by using the materials that reflect the pavement-bound solar radiation, increase evaporation and remain cooler than the conventional materials. The aim of the paper is to provide an overview of recent structure of the pavement structures that reduce the urban heat island effect. By comparison with the conventional pavement structures, the benefits of using new structures and pavement materials will be shown.

Key words: pavement construction, urban heat island, albedo

1. Uvod

Globalno zatopljenje uzrokovano je oslobađanjem stakleničkih plinova u atmosferu. Oko polovice svih stakleničkih plinova nastaje izgaranjem fosilnih goriva za stvaranje električne energije.

Promet uzrokuje dodatnih 25% stakleničkih plinova [1]. Povećanje prosječne temperature uzrokuje više toplinske energije i vodene pare u atmosferi, što dovodi do jačih kiša, snažnijih uragana, češćih valova vrućina, dok se povećava rizik od suše i požara. Katastrofe su uvijek bile uz nas i sigurno će uvijek biti. Ali kad su ovako jake i dolaze ovako naglo – nakon što intervencije postanu svakodnevne – nešto je jako pogrešno. To nešto je globalno zagrijavanje.

Urbani toplinski otoci su velegradska područja s višim temperaturama nego okolica. Više temperature rezultat su povećane apsorpcije sunčevog svjetla kod urbanih materijala, kao što su asfalt i beton, koji imaju viši toplinski kapacitet od onih u prirodnom okruženju.

Proteklih godina povećao se interes za korištenjem materijala koji umanjuju efekt urbanih toplinskih otoka i poboljšavaju toplinske karakteristike urbanog okoliša. Mnogi istraživači pokušali su vrednovati koristi za okoliš korištenjem svjetlijih površina. Znanstvenici pokušavaju istražiti utjecaj optičkih i toplinskih karakteristika materijala na temperaturu u urbanim sredinama kao i moguću uštedu energije tijekom ljetnog perioda [1,2].

S obzirom na strukture kolnika koje se najčešće koriste, postoje dva načina za smanjivanje efekta urbanih toplinskih otoka [3]:

- Gradnjom površina koje reflektiraju veću količinu dolaznog Sunčevog zračenja i
- Projektiranjem poroznih struktura kolnika koje osiguravaju hlađenje putem evaporacije.

Kod površina koje reflektiraju veću količinu dolaznog Sunčevog zračenja najveći utjecaj za smanjenje efekta urbanih toplinskih otoka imaju ugrađeni materijali. Naime, boja agregata i boja veziva bitno utječe na zagrijavanje same konstrukcije. Navedeni način smanjenja ovog efekta najčešće se koristi kod rekonstrukcije postojećih kolnika iako se može koristiti prilikom planiranja gradnje nove konstrukcije.

Kod poroznih struktura kolnika najveći utjecaj na hlađenje konstrukcije ima voda koja se procjeđuje. Navedeni način pogodan je kod novih kolnika budući da sama struktura kolnika je bitno drugačija nego kod konvencionalnih kolničkih konstrukcija.

Faktori koji utječu na zagrijavanje kolničke konstrukcije i zraka iznad nje su [2]:

- Sunčevo zračenje

Sunčevo zračenje sastoji se od ultraljubičastih (5%), vidljivih (43%) i infracrvenih zraka (52%).

- Sunčeva refleksija (albedo)

Sunčeva refleksija je mjera moći odbijanja svjetlosti koju ima neka površina ili tijelo. To je omjer odbijenog i primljenog elektromagnetskog zračenja. Vrijednost albeda klasičnih cestograđevnih materijala kao što su asfalt i beton kreće se od 5 do 40% što znači da apsorbiraju 95 do 60% energije Sunca.

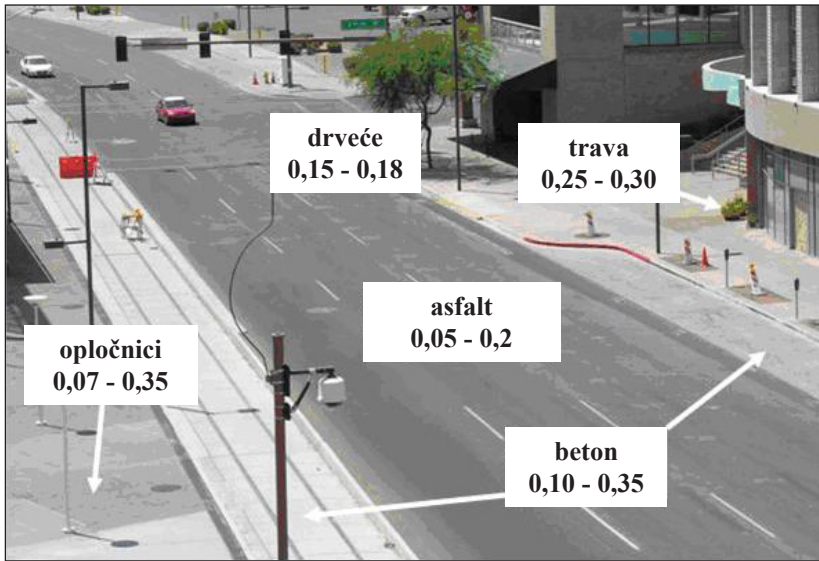
Albedo vrijednosti se kreću od 0 (savršenu upijajuće površine) do 1 za (savršeno reflektirajuće površine).

- Toplinsko zračenje

Toplinsko zračenje označuje koliko materijal zrači topline po jedinici površine pri zadanoj temperaturi.

Prosječan albedo Europskih i Američkih gradova kreće se između 0,15 i 0,30. Slika 1 prikazuje vrijednosti albeda ovisno o pokrovnom materijalu. Najveći raspon u vrijednosti albeda uočava se kod asfalta (0,05-0,2) što je posljedica vrste ugrađenog agregata, udjela šupljina (tekstura površine) te boje veziva [4].

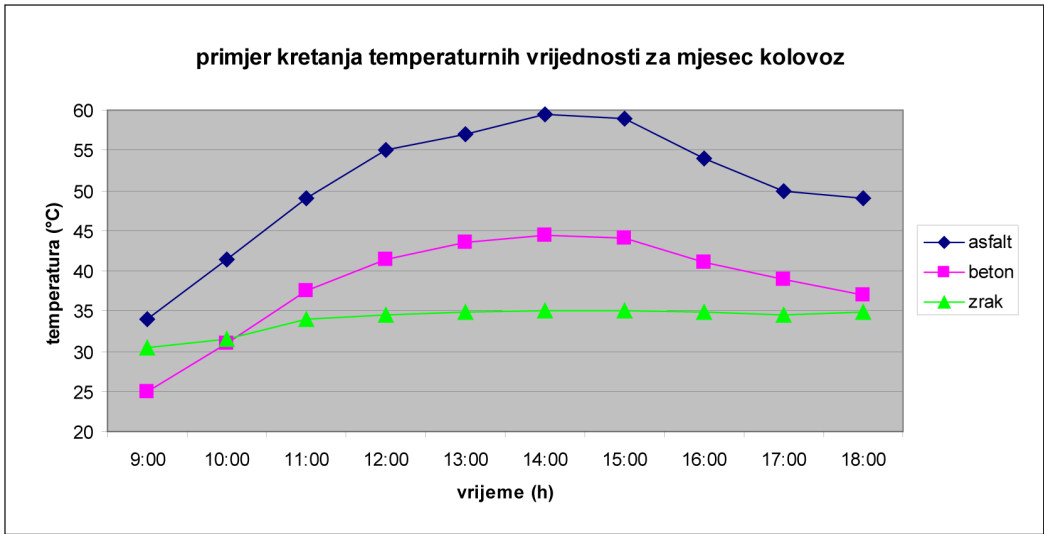
Rađene su različite studije za bolje razumijevanje toplinskih i optičkih karakteristika materijala korištenih za kolnike i njihovog utjecaja na gradsku klimu.



Slika 1. Prikaz vrijednosti albeda različitih materijala [4]

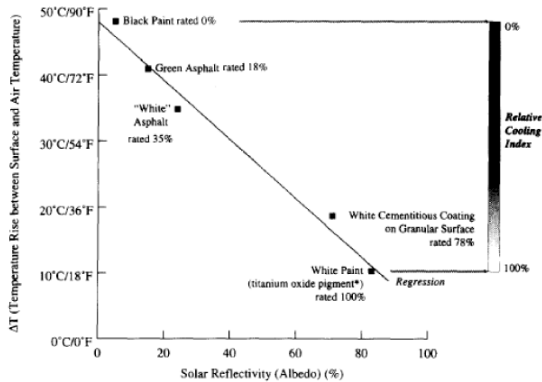
Asaeda i dr. (1996) istraživali su utjecaj različitih materijala kolnika korištenih u urbanom okolišu. Rezultati su pokazali da temperatura površine, zadržavanje topline i naknadna emisija u atmosferu je znatno veća kod asfaltnih nego kod betonskih materijala. Berg i Quinn (1978) su objavili da u ljetnom periodu bijelo obojane ceste s albedom oko 0,55 imaju gotovo istu temperaturu kao i okolni zrak, dok neobojane ceste s albedom oko 0,15 su prosječno 11°C toplije od zraka [1].

Taka i dr. (1992) su mjerili albedo i temperaturu površine različitih materijala korištenih u urbanim strukturama. Rezultati su pokazali da su bijele površine s albedom 0,61 bile samo 5°C toplije od okolnog zraka, dok je standardan šljunak s albedom 0,09 bio 30° topliji od okolnog zraka [1].



Slika 2. Primjer raspodjele temperature površine različitih materijala [1]

Slika 2 prikazuje raspodjelu temperature površina različitih materijala. Iz slike je uočljivo da se maksimalna razlika temperature površine u odnosu na temperaturu zraka događa kod asfaltnih materijala.



Slika 3. Vrijednost albeda u odnosu na temperaturnu razliku površine materijala i zraka [2]

Slika 3 prikazuje kretanje vrijednosti albeda za razliku vrijednosti temperature površine i temperature zraka. Za površine s niskim albedom (visoko apsorbirajuće) razlika između površinske temperature i temperature zraka (ΔT) može iznositi i do 50°C dok kod površina s visokim albedom (nisko apsorbirajuće), kao što je bijela

boja, razlika temperature (ΔT) iznosi oko 10°C . Iz navedenog je uočljivo da su bijele površine 40°C hladnije od tamnih površina [1].

Danas se sve više napora ulaže u strategije koje će umanjiti efekt urbanih toplinskih otoka kako bi se poboljšala kvaliteta zraka i kvaliteta života u urbanim sredinama.

Nastojanja da se efekt urbanih toplinskih otoka umanja prvenstveno uključuje [5]:

- Korištenje urbane vegetacije kojom se smanjuje direktna izloženost površina suncu, a time i zagrijavanje površina,
- Korištenje bijelih krovova za komercijalne, industrijske, institucionalne i neke stambene zgrade i
- Korištenje hladnih kolnika koji povećavaju reflektivnost površine te smanjuju apsorpciju i zadržavanje topline.

U daljnjem radu detaljnije će se objasniti utjecaj hladnih kolnika na efekt urbanih toplinskih otoka.

Mehanizam hladnih kolnika temelji se na ideji da se povećanjem refleksije smanji apsorpcija sunčeve svjetlosti što rezultira manjom temperaturom kolnika tijekom dana [3].

Kolnička konstrukcija je kombinacija materijala, prvenstveno agregata i veziva. Najčešće korištena veziva su bitumen i portland cement. Reflektivnost površine kolnika ovisi o reflektivnosti ugrađenih materijala i stupnju izloženosti istih. Npr. novi asfaltni kolnici (s tamnim vezivom) imaju nizak stupanj refleksije, međutim asfalti sa svjetlijim agregatom (npr. vapnenac) mogu biti svjetliji što rezultira većim stupnjem refleksije [3].

Hladni kolnici ugrađuju se postojećim tehnologijama i ne zahtjevaju nove materijale.

Novije vrste kolnika koriste vodu kao mehanizam hlađenja. Procjeđivanje vode hladi slojeve kolničke konstrukcije te evaporacijom snižavaju i površinsku temperaturu kolnika.

- Koristi hladnih kolnika nisu ograničene samo na ublažavanje efekta toplinskih otoka već postoje i sekundarne koristi kao što su [6]:
- Kvaliteta vode – Propusni kolnici (i asfaltni i betonski) doprinose povećanju kvalitete vode. U kombinaciji s upojnim površinama ovi kolnici se ponašaju kao filtri te poboljšavaju kvalitetu vode i pružaju veću zaštitu podzemnih voda. I propusne i nepropusne površine smanjuju temperature voda koje otječu.

- Buka – Otvoreni sastav propusnih kolnika umanjuju buku od kotača. Dio zvučnih valova apsorbira se u kolničku konstrukciju.
- Sigurnost – Propusni kolnici povećavaju sigurnost smanjujući film vode koji prekriva kolnik. Propusni kolnici znatno smanjuju prskanja, pojavu akvaplaninga i poboljšavaju vidljivost (Slika 4)



Slika 4. Problem zadržavanja vode na kolniku

- Noćna vidljivost – Više reflektivni kolnici povećavaju vidljivost noću te potencionalno smanjuju potrebu za osvjetljenjem što doprinosi uštedi i financijskoj i energetskejoj (Slika 5).



Slika 5. Noćna vidljivost na asfaltnom (lijevo) i betonskom (desno) kolniku pri istoj osvjetljenosti

2. Tipovi hladnih kolnika za nove konstrukcije

Hladni kolnici su sredstva smanjenja efekta urbanih toplinskih otoka. Termin *hladni kolnik* odnosi se na materijale koji smanjuju temperaturu kolnika uz povećanje reflektivnosti. Navedeni kolnici apsorbiraju manje sunčeve energije u odnosu na konvencionalne materijale u istim okolišnim uvjetima [4].

Kolnici su bitni za transport svih vrsta – pješaci, vozila, prijevoz dobara, parkiranje. Njihov udio zauzima značajan postotak površine u urbanim područjima. Analize vršene za američke gradove (Chicago, Houston, Sacramento i Salt Lake City) su pokazale da kolničke površine (za promet i parkiranje) mogu zauzimati do 39% površine u urbanim sredinama [5].

Kao što je u uvodu navedeno, dva su osnovna načina za umanjene efekta urbanih toplinskih otoka. Prvi način je povećanje stupnja reflektivnosti što se postiže pravilnim odabirom materijala (svjetlijeg agregata, veziva i aditiva...). Ovaj način pogodan je kod postojećih kolnika gdje se rekonstrukcijom istih može doprinjeti umanjenoj efekta urbanih toplinskih otoka, ali isto tako i poboljšati kvaliteta degradiranih površina kolnika. Kod konvencionalnih kolničkih konstrukcija mora se osigurati vodonepropusnost površine budući da slojevi kolničke konstrukcije nisu predviđeni za prihvatanje iste. Naime prodor vode u takve konstrukcije doprinio bi još većoj degradaciji kolnika. Drugi način je gradnja poroznih struktura gdje se voda koristi kao mehanizam hlađenja. Ovaj način je pogodan kod planiranja novih struktura budući da ovakvi kolnici moraju biti projektirani za prihvatanje i odvodnju vode. Kod ovih kolnika dozvoljava se procjeđivanje vode u strukturu kolnika, međutim veoma je bitno dobro zaštititi, odnosno predvidjeti, odvodnju procjeđene vode kroz donje slojeve kolničke konstrukcije.

U daljnjem tekstu objasniti će se strukture kolnika koje ublažavaju efekt urbanih toplinskih otoka povećanjem stupnja refleksije (modificirani asfaltni kolnici, konvencionalni i modificirani betonski kolnici, jednostruke površinske obrade, whitetopping i mikroasfalti) i strukture koje umanjuju navedeni efekt evaporacijom (nevegetirajući i vegetirajući propusni kolnici).

2.1. Modificirani asfaltni kolnik

Modificirani asfaltni kolnici su asfaltni kolnici koji su modificirani s materijalima s visokim albedom (materijali s albedom minimalno 0,3). Visoka vrijednost albeda postiže se upotrebom svjetlijih i jače reflektirajućih materijala. Ovoj grupi pripadaju kolnici sa svjetlijim agregatom, vezivom smole i bojani asfaltni kolnici (Slika 6). Kod navedenih vrsta kolnika koristi se bojano ili bolje reflektirajuće vezivo, pa je vrijednost albeda uvjetovana bojom agregata. Iz navedenog razloga potreban je

pravilan odabir materijala. Npr. korištenjem vapnenca asfaltni kolnik dobija svjetliju boju što umanjuje akumulaciju topline u samom kolniku. Međutim upotreba takve vrste agregata nije pogodna kod svih vrsta kolnika budući da se njime umanjuje sposobnost trenja, a time i sigurnost vožnje [5].



Slika 6. Primjer bojanog asfaltnog kolnika [7]

U pravilu, ovi modificirani kolnici se koriste kod slabije opterećenih prometnih površina, nogostupa i parkirališta. Najveći učinak postiže se kod velikih površina izloženih suncu kao što su parkirališta [5].

2.2. Konvencionalni i modificirani betonski kolnik

Konvencionalni betonski kolnik pripada u skupinu hladnih kolnika zbog svijetle boje i reflektivnosti (Slika 7). Na stupanj reflektivnosti utječe boja cementa i tip i boja agregata (osobito nakon određenog vijeka trajanja kada agregat postaje izložen) (Slika 8).

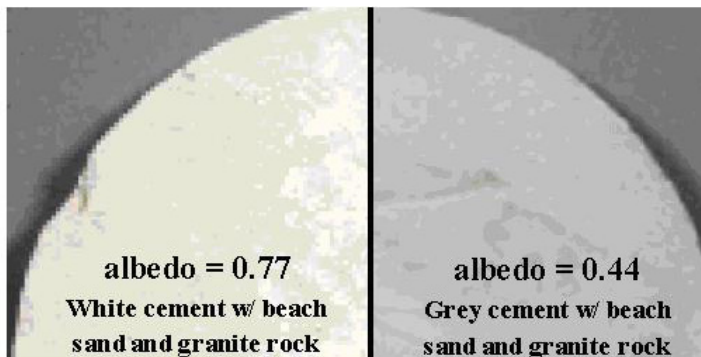
Određeni aditivi dodaju se betonu za poboljšanje ugradivosti ili performansi tijekom vijeka trajanja. Aditivi, uz povećanje čvrstoće i otpornosti, betonu daju i svjetliju boju što poboljšava reflektivnost gotovog kolnika.

Početan albedo konvencionalnih betonskih kolnika može se kretati do 40%. Upotrebom bijelog umjesto sivog cementa albedo se može povećati do 70%. Navedeni tipovi kolnika koriste se u svim područjima cestogradnje. U posljednje vrijeme u nekim zemljama (primjerice u Austriji) veća pozornost se posvećuje betonskim kolnicima. Naime, navedeni tip kolnika pokazao se kao dobar odabir

u gradovima zbog duljeg vijeka trajanja uz manje troškove održavanja. Kod ove vrste kolnika manja su oštećenja tipa kolotragova i boranja. Najveći učinak postiže se kod velikih površina izloženih suncu kao što su parkirališta [5].



Slika 7. Primjer betonskog kolnika [6]



Slika 8. Prikaz vrijednosti albeda za različite vrste cementa u uzorku betonskog kolnika [4]

2.3. Nevegetirajući propusni kolnik (eng. nonvegetated permeable pavements)

Propusni kolnici prvenstveno su istraživani kao mehanizmi kontrole otjecanja i upravljanja podzemnim vodama u urbanim područjima (Slika 9 i Slika 10).

Grupi nevegetirajućih kolnika pripadaju porozni asfalt i beton i asfalti s dodatkom gume. Porozni asfalti i betoni sadrže više pora te omogućuju otjecanje

vode kroz površinu kolnika u donje slojeve te su prvenstveno konstrukcije koje služe za bolju odvodnju oborinskih voda. Kod ovakvih konstrukcija potrebno je voditi računa o pravilnom odvođenju prikupljene oborinske vode izvan slojeva kolničke konstrukcije. Asfalti s dodatkom gume prvenstveno su istraživani za smanjenje buke u urbanim područjima. Kao i porozni kolnici, većim udjelom šupljina umanjuju temperature kolnika.



Slika 9. Primjer poroznog asfaltnog kolnika [8]



Slika 10. Primjer poroznog betonskog kolnika [9]

Kada su mokri, temperatura ovih kolnika smanjuje se evaporacijom. Kada su suhi, ovi kolnici smanjuju površinsku temperature (pogotovo noću) prijenosom topline s hladnijih donjih slojeva [5].

Ove vrste konstrukcija mogu se koristiti na svim područjima cestogradnje. Najveći učinak postiže se kod kolnika u uvjetima dovoljne vlažnosti tijekom ljetnog perioda [5].

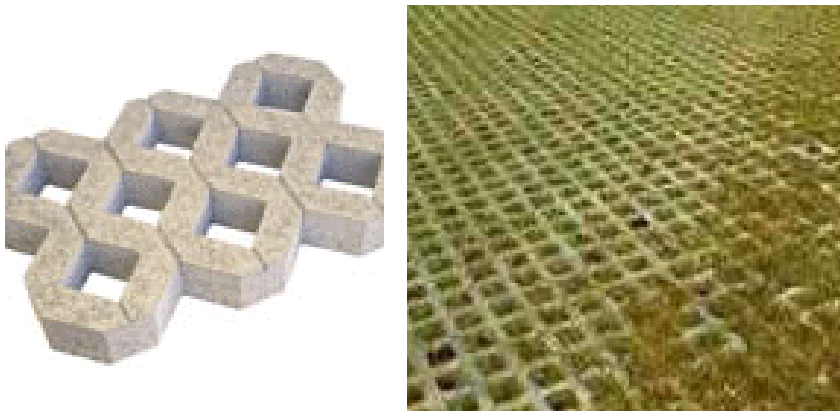
2.4. Vegetirajući propusni kolnik (eng. vegetated permeable pavements)

Vegetirajući propusni kolnici sastoje se od plastičnih, betonskih ili metalnih ćelija iz kojih raste trava.

Ovoj skupini pripadaju travnati opločnici (Slika 11) i betonski rešetkasti opločnici (Slika 12).



Slika 11. Primjer travnatog opločnika [10]



Slika 12. Primjer betonskog rešetkastog opločnika [11]

Ove vrste kolnika smanjuju temperaturu površine kroz evapotranspiraciju. U suhim uvjetima znatno su hladniji zbog prirodnih karaktersitika vegetacije.

Ove vrste konstrukcija koriste se kod slabije prometnih površina i parkirališta. Najveći učinak postiže se kod kolnika u uvjetima dovoljne vlažnosti tijekom ljetnog perioda [5].

3. Tipovi hladnih kolnika kod rekonstrukcija

3.1. Jednostruka površinska obrada (eng. *chip seals*)

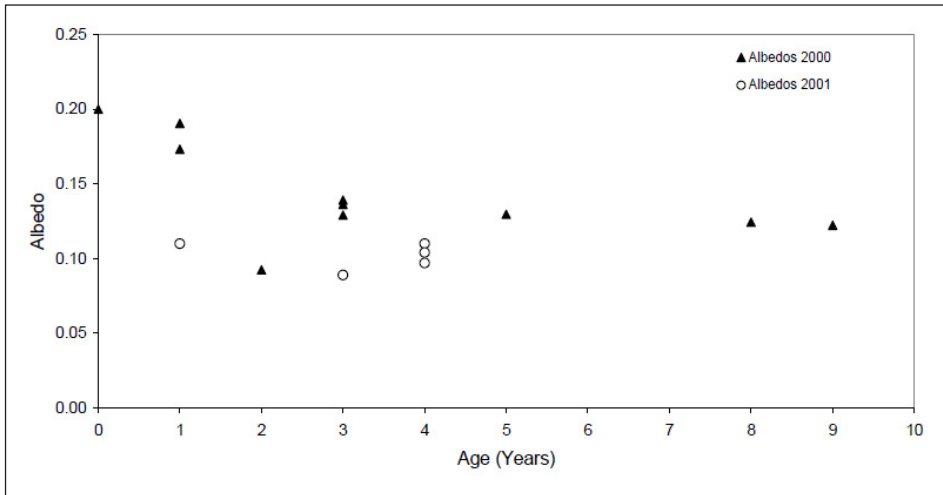
Jednostruka površinska obrada kolnika izvodi se kombinacijom tankog sloja asfalta i kamene sitneži.

Koristi se kod češće na cestama s manjim prometnim opterećenjem, a nekad i na autocestama u slučaju kad se žele poboljšati vozne i sigurnosne karakteristike habajućeg sloja [5].



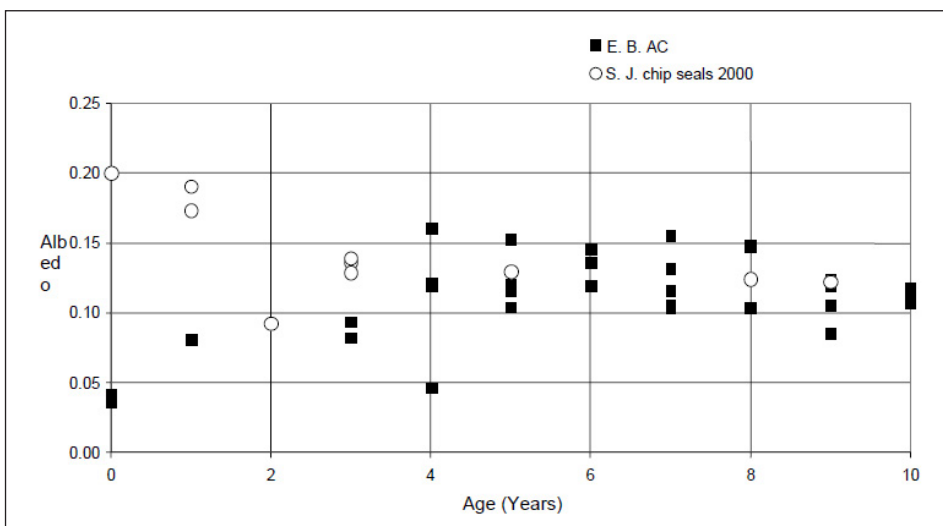
Slika 13. Primjer različite boje dijela kolnika na kojem je izvedena jednostruka površinska obrada (donji dio slike) i kolnika na kojem je zadržana stara asfaltna kolnička konstrukcija (gornji dio slike) [12]

Unatoč korištenju bitumena kao veziva, površine koje se postižu mogu biti svijetle boje (Slika 13), jer se sam proces izvođenja obrade sastoji od raspršivanja kamene sitneži po tankom sloju već nanesenog bitumena. Time se postiže jednolika i homogena tekstura površine, a sama kamena sitnež određuje boju novog kolnika [12].



Slika 14. Odnos albeda i starosti kolnika na kojem je izvedena jednostruka površinska obrada [12]

Kada je podvrgnut prometu, albedo kolnika na kojima je izvršena jednostruka površinska obrada se mijenja. Slika 14 prikazuje mjerenja albeda na gradskim ulicama San Josea u funkciji starosti kolnika u vrijeme mjerenja (simbol trokuta predstavlja mjerenje obavljeno u listopadu 2000.godine, a simbol kruga predstavlja mjerenje na istom kolniku u svibnju 2001.). Opći je trend za albedo da se smanjuju sa starošću kolnika, od svoje početne vrijednosti od oko 0,20 na oko 0,12 sa 5 godina starosti [12].



Slika 15. Odnos albeda asfaltbetonskih kolnika i kolnika sa jednostrukom površinskom obradom u zavisnosti od godina starosti [12]

Albedo asfaltbetonskih kolnika starijih od 5 godina ima prosječnu vrijednost od oko 0,12. Slika 15 pokazuje da vrijednost albeda na ovakvim kolnicima raste s godinama starosti kolnika i nakon otprilike 5 godina dostiže vrijednost 0,12, istu vrijednost koju imaju i kolnici kod kojih je rađena jednostruka površinska obrada (nakon 5 godina starosti) [12].

3.2. *Whitetopping*

Whitetopping je sloj betona, debljine obično veće od 10 cm koji se postavlja na postojeće asfaltne slojeve (kad se radi o rehabilitaciji) ili se može primijeniti na nove kolničke konstrukcije (Slika 16).

Standardni whitetopping i ultra-tanki whitetopping (debljine od 5-10 cm) obično se koriste kod rekonstrukcije dijelova ceste, raskrižja ili parkirališta [5]. Whitetopping, kao i betonski kolnik, pokazao se dobrim rješenjem u gradovima pogotovo zbog izbjegavanja oštećenja tipičnih za asfaltne kolnike u gradovima (kolotrazi i boranje).



Slika 16. Primjer kolnika sa slojem whitetopping-a [13]

3.3. *Mikroasfalt*

Mikroasfalt pripada grupi tankoslojnih asfaltnih presvlaka koje se polažu na asfaltnu ili betonsku podlogu na cestama svih grupa prometnog opterećenja, kako bi se poboljšale vozne karakteristike i zaštitilo od prodiranja vode u konstrukciju [5]. Sprječavanje prodora vode najčešći je zahtjev kod izvođenja ovakve vrste

konstrukcije. Prodor vode kod ovakvih konstrukcija je neželjen jer dovodi do ispiranja materijala slojeva, smanjenja nosivosti kolnika i daljnje degradacije kolničke konstrukcije. U slučaju kad se mikroasfalt koristi u svrhu povećanja albeda kolnika, potrebno je koristiti svijetlije materijale za izradu mikroasfalta. Novija istraživanja pokazala su da je vrijednost albeda kod kolnika sa ovakvim presvlakama oko 0.35 [14].

4. Zaključak

Znanost danas pokazuje da su gradovi i urbana područja nekoliko stupnjeva topliji od okolnih područja. Porast ukupne temperature u gradovima uglavnom se pripisuje većem broju građevina i kolnika na mjestima stabala i vegetacije. Razine smoga također su dovedene u korelaciju s porastom temperature. S porastom temperature u gradovima povećava se vjerojatnost pojave smoga i onečišćenja.

Faktori koji utječu na pojavu urbanih toplinskih otoka mogu se podijeliti na kontrolirane (povezane s projektiranjem i planiranjem) i nekontrolirane (povezane s okolišem i prirodom).

Kao dio strategije za smanjenje efekta urbanih toplinskih otoka, hladni kolnici doprinose ublažavanju toplinskih otoka uz povećanje ugodnosti življenja u gradovima, smanjenje utroška energije i povećanje kvalitete zraka.

Različita istraživanja pokazala su da je prijenos topline s asfaltnih kolnika bitno veći od onoga sa hladnih kolnika. Asfaltni kolnici apsorbiraju više sunčevog zračenja tijekom dana što rezultira značajnijim otpuštanjem topline tijekom noći i razlog je da visoke temperature zraka ustraju i tijekom noći.

Strategija za umanjene urbanih toplinskih otoka obuhvaća:

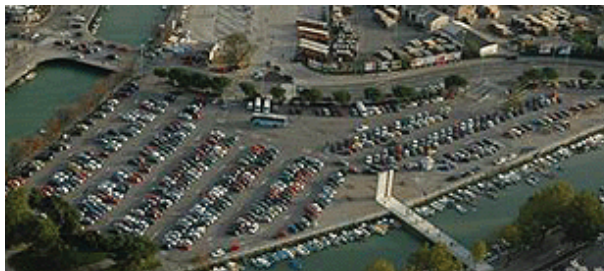
- Korištenje materijala s visokim albedom (hladni kolnici)
- Izgradnja poroznih kolnika (pogotovo na parkiralištima)
- Planska sadnja drveća uz prometnice (zbog osiguranja sjene na kolnicima)

Izgradnja “zelenih” parkirališta (prijedlog je zasaditi jedno stablo na pet parkiranih mjesta)

Budući da su asfaltni kolnici u gradovima najzastupljeniji, rekonstrukcijom takvih kolnika u hladne kolnike uvelike bi se smanjio efekt urbanih toplinskih otoka i povećao komfor življenja.

Buduća nastojanja trebala bi se usredotočiti na poticanje strategije za promjene gradske geometrije i korištenja alternativnih vrsta materijala. Istraživanja o ovom problemu su u tijeku, a podizanje svijesti o važnosti istog je veoma bitno.

Potrebno je odlučiti želimo li imati ovakva gradska područja?



Ili možda ovakva?



5. Literatura

- [1] L. Doulos, M. Santamouris, I. Livada; Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials; Internal report Group Building Environmental Studies, Section Applied Physics, Physics Department, University of Athens Panepistimioupolis, Athens 157 84, Greece; January 2004.
- [2] P. Berdahl, S Bretz; Spectral solar reflectance of various roof materials, Cool Building and Paving Materials Workshop, Gaithersbutg, MD, July 1994.
- [3] Cool pavement report, EPA Cool Pavements Study – Task 5, Cambridge Systematics Inc., Maryland, June 2005.
- [4] K. E. Kaloush, J. D. Carlson, J. S. Golden, P. E. Phelan; The Thermal and Radiative Characteristics of Concrete Pavements in Mitigating Urban Heat Island Effects; Final Report, March 2008.
- [5] E. Wong, K. Hogan, J. Rosenberg, N.R. Patel, A. Denny; Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Cool Pavements; Cambridge Systematics Inc.; June 2005.
- [6] www.concretethinker.com

- [7] www.richardspaving.com
- [8] www.stormh2o.com
- [9] www.surfacecharacteristics.com
- [10] www.boddingtons-ltd.com
- [11] www.paversearch.com
- [12] M. Pomerantz, H. Akbari, S.-C. Chang, R. Levinson and B. Pon; Examples of Cooler Reflective Streets for Urban Heat-Island Mitigation: Portland Cement Concrete and Chip Seals, Lawrence Berkeley National Laboratory, April 2003
- [13] www.tfhr.gov
- [14] Tran, N., B. Powell, H. Marks, R. West, A. Kvasnak. 2008. Strategies for Design and Construction of High-Reflectance Asphalt Pavements. Under review for the 2009 Transportation Research Board Annual Meeting

Koordinatori za zaštitu na radu kod investitora, glavnog projektanta i poslodavca

Safety at Work Coordinators of Investor, Main Planner and Employer

Marinko Đ. Učur

Sažetak. Zakon o zaštiti na radu (ZZR), u odredbama članaka 55-58 u posebnoj glavi 10. uređuje pitanja i odnose pod naslovom (nazivom) “Privremena i zajednička radilišta”.

Prateći svrhu Zakona na “uvođenju mjera za poticanje unapređivanja sigurnosti i zdravlja radnika na radu, sprječavanje ozljeda na radu, profesionalnih bolesti, drugih bolesti u svezi s radom te zaštita radnog okoliša”, u navedenim odredbama stvorena je obveza poslodavcima “koji obavljaju građevinske ili montažne radove, na iskorištavanju šuma ili radove u brodogradilištima, dužni su prije početka radova na privremenim radilištu urediti radilište i osigurati da se radovi obavljaju u skladu s pravilima zaštite na radu (čl. 55).”

Ako poslove obavljaju dva ili više izvođača, odnosno dva investitora moraju imati koordinateure za zaštitu na radu u fazi izvođenja radova. Koordinator ima Zakonom određene zadaće. “Za koordinateure za zaštitu na radu se mogu imenovati osobe koje ispunjavaju uvjete propisane posebnim propisima”, a to propisuje ministar nadležan za rad. U ovom radu komentiraju se odredbe propisa o tome (Pravilnik o uvjetima i stručnim znanjima za imenovanje koordinateura za zaštitu na radu te polaganju stručnog ispita, NN 101/09, od 21.8.2009.).

Ključne riječi: povremena i zajednička privremena radilišta, koordinator za zaštitu na radu, uvjeti, stručna znanja.

Abstract. Safety at Work Law regulates the temporary and common work-sites (art. 55-58, chapter 10). The purpose of this Law is to introduce the measures for the promotion of the safety at work, for the prevention of the professional injuries,

professional illnesses, other illnesses connected with work, as well as for the protection of the environment. The duty of the employers (building constructors, installation constructors, employers who exploit the forest, and shipyards constructors), is to, before the work at the temporary work-sites starts, arrange the work-site and ensure that the work is performed according to safety at work rules. If the work has to be performed by two constructors, or two investors, they must have safety at work co-ordinators while the work is performed. As coordinators could be appointed the persons who fulfill certain conditions regulated by the acts of the minister of labour. These rules are commented in this article.

Key words: temporary and common work-sites, safety at health co-ordinator, conditions, professional knowledge.

1. Uvod

Pravilnikom o uvjetima i stručnim znanjima za imenovanje koordinatora za zaštitu na radu te polaganju stručnog ispita (NN 101/09, od 21.08.2009.), kojega je donio Ministar gospodarstva, rada i poduzetništva “propisuju se uvjeti stručne sprema i radnog iskustva za polaganje stručnog ispita, te program, sadržaj i način polaganja stručnog ispita za koordinatora za zaštitu na radu” (u nastavku: Pravilnik). Ovlast (nadležnost) za donošenje Pravilnika nalazi se u odredbama članka 57a stavka 3. i članka 93. stavka 9. Zakona o zaštiti na radu (NN 59/96, 94/96, 114/03, 100/04, 86/08, 116/08 i 75/09., u nastavku: ZZR). Zaštita na radu sastavni je dio organizacije i procesa rada i proizvodnje. To se odnosi i na “minimalne sigurnosne i zdravstvene uvjete za privremena i pokretna radilišta”. To je uređeno Pravilnikom o zaštiti na radu na privremenim ili pokretnim gradilištima (NN 51/2008., primjenjuje se od 13. svibnja 2009.), kojega je donio nadležni ministar.

Navedene podzakonske (provedbene) propise treba analizirati s dva aspekta: primarno, s aspekta zaštite na radu, i drugo, prema propisima o gradnji i drugim “posebnim propisima”. To određuju brojni pojmovi, kategorije, instituti i pravni odnosi među subjektima investicija i građenja.

Korišteni su ovi i drugi pojmovi: plan izvođenja radova, prijava gradilišta, imenovanje koordinatora, poštivanje načela zaštite na radu u fazi izrade projekta i u fazi izvođenja radova (kao obveza investitora i izvođača); obveze izvođača i drugih osoba na gradilištu, obavještanja, savjetovanja i sudjelovanja radnika itd.

Prema odredbama članka 183. Zakona o prostornom uređenju i gradnji (NN, 76/07) “ako u građenju sudjeluju dva ili više izvođača, investitor određuje glavnog izvođača koji je odgovoran za međusobno usklađivanje radova i koji imenuje glavnog inženjera gradilišta” koji je odgovoran “za cjelovitost i međusobnu

usklađenost radova, za međusobnu usklađenost ... te koordinira primjenu propisa kojima se uređuje sigurnost i zdravlje radnika tijekom izvođenja radova”.

Pravilnik o zaštiti na radu na privremenim ili pokretnim gradilištima usklađen je i s Direktivom 92/57/EEC od 24. lipnja 1992. o osiguranju minimalnih zahtjeva za sigurnost i zdravlje na privremenim i pokretnim radilištima (*Council Directive 92/57/EEC of 24 June 1992 on the implementation of minimum safety and health requirements at temporary of mobile construction sites (eight individual directive within the meaning of Article 16/1) of Directive 89/391/EEC (OJL 245, 26.8.1992. st. 0006-0022).*

Taj Pravilnik se ne odnosi na jednostavne građevine (“određene posebnim propisima”) u dijelu imenovanja koordinatora.

2. Direktiva 92/57/EEC o osiguranju minimalnih zahtjeva za sigurnost i zdravlje na privremenim i pokretnim radilištima

Direktiva 92/57/EEC od 24. lipnja 1992. o osiguranju minimalnih zahtjeva za sigurnost i zdravlje na privremenim i pokretnim radilištima je osma pojedinačna direktiva u smislu članka 16 Direktive 89/391/EEC, s kojom je djelomično usklađeno zakonodavstvo zaštite na radu u Republici Hrvatskoj. Prema navedenoj odredbi, VE treba po prijedlogu Komisije (temeljem članka 118 a Ugovora o osnivanju), prihvatiti pojedine direktive, na područjima navedenim u dodatku Direktive 89/391/EEC, a naročito za radna mjesta, radnu opremu, osobna zaštitna sredstva, rad sa zaslonima, rukovanje teškim teretima koje izaziva povredu leđa, povremena i pokretna radilišta (radna mjesta), ribarstvo i poljoprivreda (podcrtao U.M.). Zbog toga odredbe Direktive 92/57/EEC od 24 lipnja 1992. treba tumačiti zajedno s odredbama Direktive 89/391/EEC.

Zakon o zaštiti na radu sada ima cjelovite odredbe u članku 57, kojom uređuje obveze “više poslodavaca koji rade na zajedničkom radilištu”, a napose u zaštiti “svojih” ali i radnika drugih poslodavaca; sporazumno organiziranje rada, osobe odgovorne za koordinaciju zaštite na gradilištu i evidencije. No, treba imati u vidu i druge odredbe Zakona o zaštiti na radu (u nastavku: ZZR) a posebno odredbe Zakona o izmjenama i dopunama Zakona o zaštiti na radu (u nastavku: ZID ZZR).

Direktiva Vijeća 92/57/EEC od 24. lipnja 1992. o zadovoljavanju minimalnih i zdravstvenih uvjeta na privremenim ili pokretnim gradilištima, donesena je pozivom na nekoliko izvora (viza propisa, pravni temelj), pa se može govoriti o stupnjevitom (stupanjskom) pozivanju na izvore. Prvo je Ugovor o osnivanju EEZ, a posebno njegov članak 118 a, slijedi prijedlog Komisije, koji je podnesen “u dogovoru sa Savjetodavnim odborom za zaštitu sigurnosti, higijene i zdravlja

na radu. Vijeće EZ je donijelo Direktivu i u suradnji s Europskim parlamentom, uz to “imajući na umu mišljenje Odbora za gospodarska i socijalna pitanja”. Člankom 118 a Ugovora o osnivanju EEZ, određuje da se direktivama moraju usvojiti minimalni uvjeti za poticanje u radnom okolišu u cilju višeg stupnja zaštite sigurnosti i zdravlja radnika, a da se time ne nametnu administrativna, financijska i pravna ograničenja “koja bi priječila stvaranje (osnivanje, organiziranje) i razvijanje malih i srednjih poduzeća.

U uvodu Direktive ističe se da “privremena i pokretna gradilišta čine područje rada na kojem su radnici izloženi posebno visokoj razini rizika”, te da su “nezadovoljavajuća arhitektonska ili organizacijska rješenja, ili loše planiranje radova tijekom pripreme projekta” uzrokom “u više od polovice nesreća na radu do kojih dolazi na gradilištima zajednice”. Činjenica je da su u nacionalnom zakonodavstvu država članica, postoji propisana obveza da su izvođači ili investitori dužni prije početka radova (određenih karakteristika) prijaviti početak radova nadležnim tijelima uprave. Cilj je poboljšavati koordinaciju između različitih strana koje su vezane uz pripremu projekata a isto tako i uz radove u cjelini, jer je veliki broj nesreća na radu uzrokovan neodgovarajućom koordinacijom a “naročito tamo gdje različita poduzeća rade istovremeno ili nastavno (susljedno) na istom privremenom ili pokretnom gradilištu”. Koordinacija se odnosi na subjekte u projektiranju a posebne na subjekte koji izvode radove, a zahtjev je poštivanje minimalnih uvjeta u sigurnosti i zdravlju radnika na privremenim ili pokretnim gradilištima. Pored drugih bitne su Direktiva Vijeća 89/655/EEC od 30. studenog 1989. u vezi s minimalnim sigurnosnim i zdravstvenim uvjetima u pogledu radne opreme koju radnici koriste na radu (druga pojedinačna direktiva), Direktiva Vijeća 89/656/EEC od studenog 1989. o minimalnim zdravstvenim i sigurnosnim uvjetima u pogledu osobne zaštitne opreme koju radnici koriste na radnom mjestu (treća pojedinačna direktiva), Direktiva Vijeća 89/106/EEC od 21. prosinca 1988. predmet koje je prilagodba zakona, propisa i administrativnih odredaba država članica u vezi s građevnim proizvodima i Direktiva Vijeća 89/440/EEZ od 18. lipnja 1989. sadržajem koje se mijenja Direktiva 71/305/EEZ koja se odnosi na koordinaciju postupaka pri dobivanju ugovora za javne radove.

2.1. Predmet Direktive

Predmet Direktive 92/57/EEZ od 24. lipnja 1992. čine detaljne odredbe (preciznije pa i strožije) naslonjene na Direktivu 89/391/EEZ koja se primjenjuje na cjelokupno područje sigurnosnih i zdravstvenih uvjeta koji moraju biti zadovoljeni na privremenim ili pokretnim gradilištima. “Ova se Direktiva ne odnosi na bušenje i vađenje minerala u rudnicima i kamenolomima u smislu članka 1 (2) Odluke Vijeća 74/326/EEZ od 27. lipnja 1974. o proširenju odgovornosti

Povjerenstva za pitanja sigurnosti i zdravlja u rudnicima na sve djelatnosti za vađenje minerala” (članak 1. stavak 2.). Za razumijevanje minimalnih sigurnosnih i zdravstvenih uvjeta koji moraju biti zadovoljeni na privremenim ili pokretnim gradilištima u Direktivi se daju brojne definicije. “Privremeno ili pokretno gradilište” je bilo koje gradilište na kojem se izvode građevinski radovi u niskogradnji ili visokogradnji” (iskopavanje, zemljani radovi, izgradnja, montaža i demontaža montažnih elemenata, preinaka ili podešavanje, izmjene, obnova, popravci, demontiranje, rušenje, održavanje u dobrom stanju, održavanje (bojenje i čišćenje), drenaža (Dodatak I Direktive 92/57/EEZ). “Klijent” (investitor i izvođač) je bilo koja fizička ili pravna osoba za koju se projekt izvodi. “Nadzornik radova” je bilo koja fizička ili pravna osoba koja je odgovorna za projektiranje i/ili izvođenje i/ili nadzor izvođenja projekta a koja djeluje u ime klijenta (investitora). “Koordinator za pitanja sigurnosti i zdravlja” u pripremljenoj fazi projekta “je bilo koja fizička ili pravna osoba kojoj je klijent i/ili nadzornik projekta, za vrijeme pripreme izrade projekta, povjerio obavljanje dužnosti” (koje određuje Direktiva). U Direktivi se javlja definicija osobe “čija profesionalna djelatnost doprinosi završetku projekta”. U članku trećem Direktiva uređuje obveze investitora i nadzornika projekta koje se odnose na postavljanje (imenovanje, određivanje) “jednog ili više koordinatora za pitanje sigurnosti i zdravlja”. “Koordinator se imenuje “za bilo koje gradilište na kojem je prisutno više od jednog izvođača (poduzetnika)”. Ovdje su moguća odstupanja, ako država to dopusti “nakon konzultiranja s upravom i radnicima”. Taj tripartitni socijalni dogovor isključen je “tamo gdje radovi o kojima je riječ uključuju posebne rizike...” U Dodatku II. Direktive, utvrđen je “kratki popis radova koji uključuju posebne rizike za sigurnost i zdravlje radnika...” To su: radovi koji radnike dovode u opasnost od zatrpavanja pod odronima zemlje, utapljanja u močvarama ili pada s visina gdje je rizik naročito povećan zbog prirode posla ili korištenih postupaka ili od okoliša na mjestu radova ili gradilištu; radovi koji ugrožavaju radnike zbog kemijskih ili bioloških tvari koje predstavljaju naročitu opasnost po sigurnost i zdravlje ili podliježu zakonskim uvjetima u pogledu praćenja zdravlja, radovi s ionizirajućim zračenjem koji zahtijevaju označavanje kontroliranih ili nadziranih područja prema posebnoj direktivi Euroton; radovi u blizini visokonaponskih dalekovoda; radovi pri kojima se radnici izlažu opasnosti od utapljanja, radovi na bunarima, zemljani radovi ispod površine i radovi u tunelima, radovi koji izvode vozači sa sustavom dovoda zraka, radovi koji izvode radnici u kesonima s komprimiranim zrakom, radovi koji uključuju upotrebu eksploziva, radovi koji uključuju montažu ili demontažu teških montažnih dijelova.

Svuda tamo gdje se javljaju poslovi s posebnim rizicima nema “sporazuma” već je imenovanje jednog ili više koordinatora, po samoj Direktivi obvezno.

Druga obveza investitora (klijenta) ili nadzornika projekta odnosi se na izradu plana zaštite sigurnosti i zdravlja i to “prije otvaranja gradilišta (članak 3. st.2. Direktive).

Za vrijeme pripreme faze koordinator(i) “sastavljaju ili daju sastaviti plan sigurnosti i zdravlja koji predviđa (određuje, postavlja) pravila primjenljiva za dotično gradilište uzimajući u obzir, tamo gdje je to potrebno, industrijske aktivnosti koje se odvijaju na gradilištu, a uključuju i mjere (posebne mjere) koje se odnose na radove koji ulaze u jednu ili više kategorija “posebnih rizika” (članak 3. st.2. Dodatak II Direktivi i članak 5 st.1. (b)).

Treća obveza investitora ili izvođača (klijenta) ili nadzornika projekta odnosi se na dostavljanje prethodne obavijesti nadležnim organima prije početka radova (članak 3. st.3). Ta obveza odnosi se na slučaj da se radi o gradilištima “na kojima je predviđeno da radovi traju dulje od 30 radnih dana i na kojim je istovremeno zaposleno više od 20 radnika, ili na kojima je predviđeno da opseg radova premaši 500 osoba – dana”.

Prethodna obavijest ima ovaj propisani sadržaj: datum slanja; točna adresa gradilišta; ime(na) i adresa(e) klijen(a)ta (investitora i izvođača); tip projekta; ime(na) i adresa(e) nadzornika projekta; ime(na) i adresa(e) koordinatora za sigurnost i zdravlje u priprema fazi projekta te u fazi izvođenja projekta; planirani datum za početak radova na gradilištu; planirano trajanje radova na gradilištu; procjena maksimalnog broja radnika na gradilištu; planirani broj građevinskih poduzetnika i privatnika (izvođača i kooperanata (podizvođača) na gradilištu); pojedinosti o građevinskim poduzetnicima (izvođačima) koji su već izabrani (Dodatak III Direktive 92/57/EEC i čl. 3. st. 3 Direktive).

Odredbama članka 4 Direktiva daje obveze nadzornom inženjeru (nadzorniku projekta) ili “gdje je prikladno” investitoru i izvođaču (klijentu) da vodi računa o općim načelima prevencije u vezi sa sigurnošću i zdravljem navedenim u Direktivi 89/391/EEZ, za vrijeme različitih faza projektiranja i pripreme projekta “a posebno: kad se odlučuje o arhitektonskim, tehničkim i/ili organizacijskim aspektima planiranja različitih dijelova ili faza rada koji će se izvoditi istovremeno ili sosljedno (nastavno), te kad se procjenjuje razdoblje potrebno za donošenje takvih radova ili faza rada. Pri tome uzima u obzir “sve planove sigurnosti i zdravlja” i odgovarajuću dokumentaciju “koja odgovara osobinama projekta i koja sadrži relevantne informacije o zaštiti sigurnosti i zdravlja što ih treba uzeti u obzir za vrijeme bilo kakvih narednih radova” (čl.4. st.2, čl.6. st.1. (c)) ali i preinaka plana (članak 6 (c) Direktive).

Direktiva propisuje posebne obveze koordinatora u fazi izvođenja radova (članak 6). Koordinator za pitanje zaštite sigurnosti i zdravlja i koordiniraju primjenu općih načela prevencije i sigurnosti kad se odlučuje o tehničkim i/

ili organizacijskim aspektima planiranja različitih dijelova ili faza rada koji će se izvoditi istovremeno ili susljedno (nastavno), te kad se procjenjuje razdoblje potrebno za dovršenje takvih radova ili faza rada. Druga obveza koordinatora je primjena propisa i načela, te zahtijevanje od izvođača (poslodavca) da se pridržavaju plana zaštite sigurnosti i zdravlja na određenom gradilištu.

Koordinatori pripremaju i potiču primjenu “bilo kakve potrebne preinake plana zaštite sigurnosti i zdravlja i dokumentacije za određeno gradilište... kako bi se vodilo računa o napredovanju radova i svim promjenama koje se događaju”.

Koordinatori organiziraju suradnju svih izvođača na određenom gradilištu i “koordiniraju njihove djelatnosti radi zaštite radnika i sprječavanja nesreća i ugrožavanje zdravlja na radu, sa zahtjevom za uzajamno informiranje svih.

Nadalje, koordinatori koordiniraju mehanizme kako bi provjerili pravilnu primjenu radnih postupaka te poduzimaju mjere “kako bi se osiguralo da pristup na gradilište imaju samo ovlaštene osobe”.

Bez obzira na imenovanje koordinatora za obavljanje dužnosti u zaštiti na radu prema ovoj Direktivi, to ne oslobađa investitora izvođača i nadzornog inženjera od odgovornosti koje u tom smislu imaju, niti to utječe na načelo odgovornosti poslodavca kako je određeno 89/391/EEZ (članak 7 Direktive).

Kako je već navedeno Direktiva 89/391/EEZ o poticanju unaprjeđivanju sigurnosti zdravlja radnika na radu je temeljna direktiva u oblasti zaštite na radu, na koju se naslanjaju druge. Tako je u članku 8 Direktive 95/57/EEC uređen taj odnos pozivom na članak 6. Direktive 89/391/EEZ, kojim su uređene “osnovne obveze poslodavaca”.

Mjere koje se odnose na sigurnost, higijenu i zdravlje na radu ne trebaju ni u kom slučaju financijski opterećivati radnike (ZZR, čl. 16. u svezi s čl. 6. st. 5 Direktive 89/391/EEC). “Kada dva ili više poslodavaca obavljaju poslove istovremeno na jednom radilištu dužni su surađivati u primjeni odredaba ovoga Zakona” (a to određuje i članak 6. st. 4. Direktive u primjeni sigurnosnih, zdravstvenih i odredaba o higijeni rada, vodeći računa o naravi djelatnosti...). Stvorene su obveze poslodavcima gdje njih više “dijele prostor” da usklađuju svoj rad u pogledu zaštite i preventivnih mjera te obavještavaju jedan drugoga i svoje odgovorne radnike o tim opasnostima.” (ZZR, čl. 14.; Zakon o gradnji, NN 175/03 i 100/04).

To se posebno odnosi na: održavanje gradilišta u redu i zadovoljavajućeg stanja čistoće; izbor lokacija za radne punktove imajući na umu kako se pristupa tim punktovima i određujući smjerove kretanja ili površine za prolaz i kretanje ili za opremu; uvjete u kojima se rukuje različitim materijalima, tehničko održavanje i provjera opreme i instalacija, posebno rukovanje opasnim materijalima i/ili

tvarima; odlaganje i uklanjanje otpada i šute, pojedinih radnji kao i sveukupna suradnja s trećim osobama i sa drugima u blizini mjesta gradilišta (čl. 8 Direktive) 92/57/EEZ od 24.06.1992.). Poslodavci su dužni radi očuvanja sigurnosti i zdravlja na gradilištu “uzeti u obzir upute koordinatora za pitanja sigurnosti i zdravlja”, te “mjere koje su uz skladu s minimalnim uvjetima istovremenim u Dodatku IV Direktive”.

Obveze propisane Direktivom primjenjuju se gdje je god to potrebno zbog osobina gradilišta, aktivnosti, okolnosti ili opasnosti.

Opći minimalni uvjeti za radne punktove na gradilištu odnose se na: stabilnost i čvrstoću; instalacije za distribuciju energije; smjerove kretanja i izlaza u slučaju opasnosti (prema Direktivi 77/576/EEC); otkrivanje i suzbijanje požara; ventilaciju; izloženost posebnim rizicima, temperaturu, prirodnu i umjetnu rasvjetu radnih punktova, prostorija i prolaza na gradilištu, vrata i rampe, prolaze – područja opasnosti; prostore za utovar i rampe, slobodu kretanja na radnom punktu; prva pomoć, sanitarnu opremu (garderobe i ormariće, tuševe i umivaonike, nužnike i umivaonike); prostorije za odmor i/ili prostor za boravak; trudnice i dojilje, radnike s invaliditetom i druge odredbe.

Posebni minimalni uvjeti za radne punktove na gradilištima (dio “B”) odnose se na dvije skupine. Prvu skupinu čine “unutarnju radni punktovi na gradilištu” i ovi elementi: stabilnost i čvrstoća, vrata za slučaj opasnosti, ventilacija, temperatura, prirodna i umjetna rasvjeta, podovi, zidovi, stropovi i krovovi prostorija, prozori i svjetlarnici, vrata i ulazi, prometnice, posebne mjere za pokretne stepenice i pomične trake za pješake, dimenzije prostorija i količina zraka u prostoriji.

U Dijelu druge skupine (“Odjeljak II) utvrđeni su minimalni uvjeti za vanjske radne punktove na gradilištu, i to: stabilnost i čvrstoća, instalacije za distribuciju energije; atmosferski utjecaj, predmeti koji padaju, padovi s visine, skele i ljestve, oprema za dizanje, vozila i strojevi za iskopavanje i rukovanje materijalima, instalacije, strojevi, oprema, iskopi, bunari, podzemni radovi, tuneli i zemljani radovi, rušenje, metalne ili betonske konstrukcije, oplata i teški montažni dijelovi, zagati i kesoni (Direktiva 89/655/EEZ).

Radnici moraju biti informirani o svim mjerama koje se poduzimaju u vezi sa zaštitom njihove sigurnosti i zdravlja na gradilištu. Obavijesti moraju biti razumljive radnicima i/ili njihovim predstavnicima na koje se odnose” (članak 11. Direktive). To ne smije biti u suprotnosti s odredbama članka 10 Direktive 89/391/EEZ, koji se odnosi na obavijesti radnicima i obveze koje u tom smislu imaju poslodavci. Takva su i rješenja u odredbama članka 69 – 70 ZZR.

U čl. 12. Direktive utvrđuje se da će se savjetovanje s radnicima i njihovo sudjelovanje odvijati “u skladu s člankom 11 Direktive 89/391/EEZ... uz osiguranje, gdje god je to potrebno, primjerene suradnje između radnika i/ili njihovih predstavnika u poduzećima koja izvode radove na tom mjestu, uz poštivanje stupnja rizika i veličine gradilišta”. Čl. 11. Direktive 89/391/EEC odnosi se na “Savjetovanje i sudjelovanje radnika”; kada se radi o pitanjima koja se odnose na sigurnost i zdravlje na radu, u skladu s nacionalnim zakonima i praksom. Takva su i rješenja u odredbama čl. 66 – 68. ZZR (Odbor zaštite na radu).

U članku 13. Direktive uređena su pitanja izmjene i dopune Dodataka I., II. i III. Izmjene usvaja Vijeće po postupku propisanom člankom 118 a Ugovora o osnivanju. Vijeće po postupku propisanom uslijedit će po usvajanju direktiva o tehničkom usklađivanju i normizaciji s obzirom na privremena ili pokretna gradilišta i/ili ako dođe do promjene tehničkog napretka i promjena u međunarodnim propisima ili uvjetima (ili zvanju) s područja privremenih ili pokretnih gradilišta.

Direktiva 92/57/EEZ sastavljena je u Luxemburgu 24. lipnja 1992. i upućena državama članicama EU, “da donesu zakone, propise i upravne mjere potrebne radi usklađivanja s ovom Direktivom najkasnije do 31. prosinca 1993”, te o ovome odmah obavijestiti komisiju EU.” Svaki objavljeni propis mora se pozvati na Direktivu i dostaviti Komisiji EU. Redovita izvješća države dostavljaju svake četvrte godine o praktičnoj provedbi ove Direktive “ukazujući na stajališta poslodavaca i radnika”. Komisija EU obavještava i podnosi Izvještaj Europskom parlamentu, Vijeću EU, Odboru za gospodarstvena i socijalna pitanja te Savjetodavnom odboru za zaštitu sigurnosti, higijene i zdravlja na radu.

2.2. Zaključak

Sustav zaštite na Radu u Republici Hrvatskoj čine odredbe čl. 48-69 Ustava Republike Hrvatske (NN 41/01, 55/01), univerzalnih vrela u toj oblasti koji su na snazi u Republici Hrvatskoj (konvencije MOR-a; RH je od 8. listopada 1991. stranka tih Konvencija, ako ih svojim odlukama potvrdi Vlada Republike Hrvatske, v. npr. NN – MU 2/94 i dr.), ZZR-a i drugih zakona koji su doneseni za pojedine djelatnosti (npr. Zakon o gradnji, NN 175/03; Zakon o normizaciji, NN 163/03, koji se primjenjuje od 1.1.2005.; Zakon o šumama, NN 52/90 – 13/02; Zakon o rudarstvu, NN 190/03, pa propisi o željeznicama, cestama, vodnom i komunalnom gospodarstvu i dr.), pa se primjenjuje kao *lex specialis* za odnose zaštite na radu, brojni provedeni propisi, priznata pravila, kolektivni ugovori i brojne odredbe autonomnih općih akata poslodavaca (Pravilnik o vrsti objekata namijenjenih za rad kod kojih inspekcija rada sudjeluje u postupku izdavanja građevinskih dozvola i tehničkim pregledima izrađenih objekata, NN 48/97.) [1]

Taj sustav je usklađen s Direktivom EU 89/391/EEZ o uvođenju mjera za poticanje unaprjeđenja sigurnosti i zdravlja radnika na radu, koja se smatra okvirnom direktivom, a sada (makar djelomično) i s Direktivom 92/57/EET od 24.06.1992. o osiguranju minimalnih zahtjeva za sigurnost i zdravlje na privremenim i pokretnim radilištima.

Posebno se ukazuje na precizne definicije pojmova koji su korišteni u Direktivi (investitor, izvođač, nadzorni organ, koordinator i dr.).

Direktiva obvezuje na imenovanje koordinatora za pitanje sigurnosti i zdravlja (jednog ili više) za bilo koje radilište na kojem je prisutno (radi) više izvođača, a pogotovo gdje radovi uključuju posebne rizike za sigurnost i zdravlje radnika (bez obzira da li se radilo o niskogradnji ili visokogradnji). U tom smislu nužna je veća aktivnost na usklađivanju postojećih i donošenju novih provedbenih propisa iz ove oblasti (posebnih rizika).

“Građevinarstvo je najvažnija djelatnost s najvećim brojem nezgoda i poginulih radnika, ali nažalost, unatoč tim činjenicama, zaštita na radu je često zanemareni segment građevinske djelatnosti.”

Pored evidentnih uspjeha u dobro organiziranim građevinskim organizacijama, u zadnjih nekoliko godina rasla je nezaposlenost i potreba obnavljanja u ratu razrušenog, pa je osnovano dosta trgovačkih društava s minimalnim kapitalom u građevinskoj operativi, koja su zapošljavala mahom nekvalificiranu radnu snagu ili “radnike bilo koje struke”. Improvizacija u preuzimanju poslova građenja manifestirala se i na odnose zaštite na radu (neobučenos, nemar, prekovremeni rad, neznanje, neadekvatna osobna i druga zaštitna sredstva). “Rizik od nastanka teških ozljeda sa smrtnim ishodom u građevinarstvu je šest puta veći nego u drugim djelatnostima.” U 2007. bilo je u djelatnosti građevinarstva 2946 ozljeda na radu, od čega 23 smrtnih slučajeva, a 21 slučaj dogodio se na radnom mjestu.

Ozljeda ima na svim gradilištima: manje ili više dobro organiziranih, sa zahtjevnim i manje zahtjevnim projektima u niskogradnji i visokogradnji, Uzroci ozljeda su padovi, padovi s visine u dubinu, pri iskupu i zatrpavanju, pad predmeta, požari, udar groma, izljev vode, poplave, slijeganje tla, klizanje tla i slično.

Poslodavci izbjegavaju osiguranje od nezgode za svoje radnike, iako zbog toga trpe štetne posljedice. Investitori već u natječaju to traže, pa izvođači moraju dokazati “reference” pa i osiguranje od odgovornosti za štete prema trećima i prema svojim radnicima. Investitor može osigurati cijelu investiciju dok ima pravomoćnu građevnu dozvolu i zaključi ugovor o građenju.

Izvođač radova odgovara za štetne posljedice za sve što izvodi sam. Odgovornost je i na zajedničkim gradilištima. Osiguranja (ugovorna) moguća su za kraće vrijeme, za određeni slučaj.

Posebno pitanje je postupak prijave nezgode: osiguranik, poslodavac, uviđaj, prijava liječniku specijalisti medicine rada, prijava, liječenje, eventualne posljedice i dr. Utvrđuje se odgovornost radnika, poslodavaca, treće osobe, uvjeta rada i sl. (u skladu sa Zakonom o zaštiti na radu, propisima donesenim u skladu s tim Zakonom, uputama poslodavca, proizvođača strojeva i uređaja).

Bez obzira na oblike osiguranja ne može se zanemariti i zaobići primjena propisa na gradilištima odnosno rad projektanta i subjekata na zajednički projektima i gradilištima. Na to ih obvezuju i propisi o projektiranju, građenju i zaštiti na radu u Republici Hrvatskoj.

Investitor i nadzorni organ dužni su izraditi plan zaštite sigurnosti i zdravlja “prije otvaranja gradilišta”. To je obveza “klijenta” po Direktivi. Klijent može (i treba) biti i nosilac posla (glavni izvođač) – Ovi imaju obvezu i da obavijeste nadležni organ o mjerama i prije početka radova prethodnom obaviješću točno propisanog sadržaja. U tom smislu treba koristiti odredbe Zakona o gradnji i provedbenih propisa.

Direktiva obvezuje sve socijalne partnere (državu, poslodavce i radnike odnosno njihove sindikate) da uredi zaštitu na radu na zajedničkim gradilištima, na kojima se zapošljava veliki broj mladih radnika, početnika i u pravilu na određeno vrijeme. Tu je i najveći broj ozljeda na radu (pad s visine, u dubinu i na istoj ravnini, uklještenja između strojeva, alata i sl.).

Zakon o zaštiti na radu treba primjenjivati u ovom dijelu zajedno sa Zakonom o prostornom uređenju i gradnji (kao posebnom zakonu) i zahtijevati od osobe odgovorne za koordinaciju zaštite na radu na gradilištu da prilikom izvođenja radova osigura, provede i nadzire da se radovi na privremenom zajedničkom radilištu obavljaju na način da se ne ugrožava sigurnost i zdravlje. Nužna je suradnja poslodavaca izvođača radova te sprečavanje ozljeda na radu i opasnosti za zdravlje radnika.

Pored ostalog osoba odgovorna za koordinaciju zaštite na radu na gradilištu dužna je voditi dnevnu evidenciju poslodavaca i radnika nazočnih na privremenom zajedničkom radilištu (čl. 57, ZZR).

Ovaj stručan i odgovoran posao mogu obavljati samo osobe koje posjeduju potrebna stručna znanja vezana za sigurno izvođenje radova na radilištima (čl. 57. st. 5., ZZR; v. Pravilnik o zaštiti na radu u građevinarstvu, Sl. list SFRJ 42/68, 45/68 (prema čl. 114. ZZR).

ZZR-om utvrđene su visoke novčane kazne za prekršaje odredbi koje se odnose na sadržaj Direktive, odnosno ZZR-a: čl. 103-105; čl. 109. st. 1. al. 15., 16. i 17.

3. Pravilnik o zaštiti na radu na privremenim i pokretnim gradilištima

Svaki segment tog procesa treba (i mora) sadržavati sigurnost i uvjete rada kako bi se spriječilo nastajanje ozljeda na radu, profesionalnih bolesti i drugih bolesti u vezi s radom. To se odnosi i na “minimalne sigurnosne i zdravstvene uvjete za privremena i pokretna gradilišta”, što se uređuje Pravilnikom o zaštiti na radu na privremenim ili pokretnim gradilištima “N.N” 51/2008, kojega je donio ministar gospodarstva, rada i poduzetništva, pozivom na ovlasti iz odredbi članka 12. st. 1. Zakona o zaštiti na radu “N.N” 59/96, 94/96, 114/03 i 100/04.

Pravilnik je stupio na snagu 13.05.2008., a primjenjuje se u roku od godine dana od dana njegovoga stupanja na snagu, 13. svibnja 2009.

ZZR posebno uređuje subjekte i odnose (prava, obveze i odgovornosti) na privremenim i zajedničkim privremenim radilištima (t. 10 “Privremena i zajednička privremena radilišta: čl. 55-58). Prema odredbama čl. 183. Zakona o prostornom uređenju i gradnji, “ako u građenju sudjeluju dva ili više izvođača, investitor određuje glavnog izvođača koji je odgovoran za međusobno usklađivanje radova i koji imenuje glavnog inženjera gradilišta” koji je odgovoran “za cjelovitost i međusobnu usklađenost radova, za međusobnu usklađenost... te koordinira primjenu propisa kojima se uređuje sigurnost i zdravlje radnika tijekom izvođenja radova”. (podcrtao U.M.)

Odredbe ovoga Pravilnika ne primjenjuju se na bušenja i iskope u rudarskoj djelatnosti, niti na jednostavne građevine (“određene posebnim propisom”) u dijelu imenovanja koordinatora (čl. 2).

Pravilnik ima sadržaj podijeljen u XII glava i V “Dodatak” (opće odredbe, Pojmovi, Imenovanja koordinatora – Plan izvođenja radova – Prijava gradilišta, Faza izrade projekta (poštivanje načela zaštite na radu), Dužnosti koordinatora u fazi izrade projekta (koordinator I). Dužnosti koordinatora u fazi izvođenja radova (koordinator II), Obveze investitora i izvođača; Faza izvođenja radova (provedba načela zaštite na radu); obveze izvođača i drugih osoba na gradilištu; obavještavanje radnika; savjetovanje i sudjelovanje radnika, te “prijelazne i završne odredbe”).

U “Dodacima” su ovi sadržaji: Dodatak I “Nepotpuni popis radova”; Dodatak II “Nepotpuni popis posebno opasnih radova”; Dodatak III “Prijava gradilišta – tiskanica”; Dodatak IV “Minimalni sigurnosni i zdravstveni zahtjevi na gradilištima”: Dio A “Opći minimalni zahtjevi za mjesta rada na gradilištu”; Dio B “Posebni minimalni zahtjevi za mjesta rada na gradilištu (“Uvodne napomene”); Dio I “Unutarnja mjesta rada na gradilištu” (stabilnost i čvrstoća).

Nužni izlazi, provjetranje, temperatura, prirodna i umjetna rasvjeta, podovi, zidovi, stropovi i krovovi prostorija; Prozori i svjetlarnici, vrata, Prometni putovi;

Posebna mjera za pokretne stepenice i pokretne trake, veličina prostorija i zračni prostor u prostorijama); Dio II: “Vanjska mjesta rada na gradilištu”: stabilnost i čvrstoća; instalacije za distribuciju energije na gradilištu; Atmosferski utjecaji; Padajući predmeti; Padovi s visine, skele i ljestve, oprema za dizanje i prenošenje; Vozila i strojevi za iskopavanje, premještanje, izvlačenje i prijevoz materijala, instalacije, strojevi i oprema, građevinske jame, zdenci (bunari), radovi pod zemljom, tuneli i zemljani radovi, rušenje, metalni ili betonski okviri, oplata i teški montažni elementi, podvodn zvana i kesoni, rad na krovu. Dodatak V “Sadržaj plana izvođenja radova” (sadrži 16. točaka).

3.1. Defniranje pojmova

“Građenje je izvedba građevinskih i drugih radova (pripremni zemljišni, konstruktorski, instalaterski, završni, te ugradnja građevinskih proizvoda, postrojenja ili opreme) kojima se gradi nova građevina, rekonstruira, uklanja i održava postojeća građevina” (čl. 2 Zakona o prostornom uređenju i gradnji).

Iako ZZR govori o radilištu, u Pravilniku se koristi pojam “gradilište”, Prema Zakonu o prostornom uređenju i gradnji “gradilište” je zemljište ili građevina, uključivo i privremeno zauzete druge površine, potrebne za izvedbu građevinskih radova ili primjenu odgovarajuće tehnologije građenja i zaštitu na kojem se gradi, rekonstruira, uklanja, odnosno izvode radovi održavanja građevine. Može se u nomotehničkom smislu prigovarati na nedosljednost u jezičnom izražavanju pravnih propisa, a pogotovo jer se ovdje radi o provedbenom propisu.

“Privremena ili pokretna gradilišta (nastavno: gradilišta) označavaju svako gradilište na kojem se izvode građevinski odnosno montažni radovi čiji je nepotpuni popis naveden u Dodatku I koji je sastavni dio ovog Pravilnika” (čl. 3).

“Investitor je pravna ili fizička osoba u čije se ime izvode radovi”. Istu definiciju daje u čl. 178. st. 1. Zakon o prostornom uređenju i gradnji; Direktiva 92/57/EEZ koristi pojam “klijent” koji može biti investitor i izvođač “je bilo koja fizička ili pravna osoba za koju se projekt izvodi. Izvođač je poslodavac (pravna odnosno fizička osoba) koji izvodi pojedine radove na gradilištu u ime investitora”. Vidi i Zakon o nacionalnoj klasifikaciji djelatnosti (NN 98/94); Pravilnik o razvrstavanju poslovnih subjekata prema Nacionalnoj klasifikaciji djelatnosti 2007. – NKD 2007 (NN 80/07).

Na gradilištu su i brojni drugi subjekti koje Pravilnik “sužava” i definira samo kao “druge osobe na gradilištu su izvođači koji obavljaju djelatnost osobnim radom”, što je, bez obzira na “korištenje u ovom Pravilniku” restriktivan pristup. U Direktivi 92/57/EEZ je definicija osobe “čija profesionalna djelatnost doprinosi završetku projekta (privatnik)”?

Pravilnik koristi pojam koordinator (I i II) u dvije faze: Koordinator I za zaštitu na radu u fazi izrade projekta “je svaka fizička ili pravna osoba zadužena od investitora za obavljanje poslova iz članka 10. Pravilnika”, a koordinator II “za obavljanje poslova iz članka 11. Pravilnika” (čl. 3).

Inače, Direktiva 92/57/EEZ od 24.6.1992. u dijelu “postavljanje koordinatora – Plan zaštite sigurnosti i zdravlja – Prethodna obavijest” (čl. 3) utvrđuje obveze investitora i nadzornika projekta” da imenuje (odnosno odrede) “jednog ili više koordinatora za pitanje sigurnosti i zdravlja”. Koordinator se imenuje “za bilo koje gradilište na kojemu je prisutno više od jednog izvođača (poduzetnika). Moguća su i odstupanja prema nacionalnom zakonodavstvu “nakon konzultiranja s upravom i radnicima”, ako se ne radi o “radovima u kojima su uključene posebne rizike”.

“Mjesto rada, uključujući i radni okoliš , je svako mjesto i prostor pod neposrednim ili posrednim nadzorom poslodavca na kojem se radnici moraju nalaziti ili do kojega moraju dolaziti tijekom rada” (čl. 3). U Pravilniku je u članku 3. stavak drugi napisana i ova odredba: “Pojmovi: projektant, glavni projektant, inženjer gradilišta i glavni inženjer gradilišta definirani su posebnim propisima”. U tom smislu upućuje se na Zakon o prostornom uređenju i gradnji i druge propise koji se koriste u ovom radu.

3.2. Obveze investitora

Bez obzira da li je investitor (“klijent” kako kaže Direktiva 92/57/EEZ od 24. lipnja 1992) fizička ili pravna osoba, za nju se izvodi projekt i ima obveze u fazi projektiranja i u fazi građenja. Odgovornost za projektiranje je precizirana. To se, posebno odnosi na imenovanje osobe koordinatora I u fazi izrade projekta.

U odredbama st. 1. članka 4. Pravilnik propisuje: “Investitor je obvezan imenovati jednog ili više koordinatora za zaštitu na radu kada radove izvode ili je predviđena da ih izvode dva ili više izvođača”.

U “fazi izrade projekta” investitor je dužan poštivati načela zaštite na radu, propisana Zakonom o zaštiti na radu. Prema članku 7. Zakona o zaštiti na radu, sustav pravila zaštite na radu su i “pravila pri projektiranju i izradi sredstava rada”. Riječ je o osnovnim pravilima zaštite na radu, a njih su dužni primjenjivati i “kada dva ili više poslodavaca, investitor ili izvođač radova, obavljaju poslove istovremeno na jednom gradilištu”. U “opća načela” spadaju: izbjegavanje opasnosti i štetnosti, procjena opasnosti i štetnosti, sprečavanje opasnosti i štetnosti na njihovom izvoru, zamjena opasnog neopasnim ili manje opasnim, davanje prednosti skupnim mjerama zaštite nad pojedinačnim, odgovarajućeg osposobljavanja i obavješćivanja radnika, planiranje zaštite na radu s ciljem

međusobnog povezivanja tehnike, ustroja rada, ljudskih odnosa i utjecaja okoliša na radno mjesto, prilagođavanja tehničkom napretku, prilagodba rada radniku, u najširem smislu (čl. 17, ZZR).

Pravilnik to još precizira “posebice kada se odlučuje o oblikovnim, tehničkim i/ili organizacijskim aspektima kako bi se nesmetano planirale različite aktivnosti ili faze rada koje se trebaju izvoditi istovremeno ili u slijedu; kao i kada se procjenjuje potrebno vrijeme za dovršenje takvih radova ili faza rada uzimajući u obzir izvođenja radova te dokumentaciju “koja sadrži specifičnosti projekta i koja sadrži bitne sigurnosne i zdravstvene podatke, koje je potrebno primjenjivati nakon gradnje u fazi uporabe” (čl. 9, 10).

Na tome se temelje i dužnosti koordinatora I. (u fazi izrade projekta): koordiniranje primjene načela zaštite na radu, izrada plana izvođenja radova te izrada dokumentacije prema specifičnosti projekta.

U “fazi izvođenja radova” investitor je dužan imenovati koordinatora (e) – II, koji je dužan: koordinirati primjenu načela zaštite na radu: kod donošenja odluka o tehničkim i/ili organizacijskim mjerama tijekom planiranja pojedinih faza rada i kod određivanja rokova, koji su potrebni za sigurno dovršenje pojedinih faza rada, koji su potrebni za sigurno dovršenje pojedinih faza rada, koji se izvode istovremeno ili u slijedu; koordinatori izvođenja odgovarajućih postupaka i izrade “potrebnih usklađenja plana izvođenja radova i dokumentacije sa svim promjenama na gradilištu”, organiziranje suradnje i uzajamnog izvješćivanja, provjeravanja da li se radni postupci provode na siguran način i usklađivanje propisanih aktivnosti, te organizirati “da na gradilište imaju pristup samo osobe koje su na njemu zaposlene i osobe koje imaju dozvolu ulaska na gradilište” (čl. 11). Riječ je o velikom broju operativnih poslova, a osobito kada uključuju posebne rizike za sigurnost i zdravlje radnika” (“posebno opasni radovi”), kao što su: radovi u iskopima ili na sipkom ili močvarnom tlu te radovi na visini većoj od 3 m; radovi s kemijskim ili biološkim tvarima, koji posebno ugrožavaju sigurnost i zdravlje radnika i za koje je propisan poseban zdravstveni nadzor, poslovi u području ioniziranog zračenja, radovi u blizini električkih vodova visokog napona, radovi, pri kojima postoji opasnost od utapanja; radovi pri kopanju, čišćenju ili popravljaju bunara, pod zemljom ili u tunelima; radovi pri ronjenju s uporabom zraka pod tlakom; radovi u kesonu s atmosferom stlačenog zraka; radovi s eksplozivnim i lako zapaljivim tvarima; radovi u prostorima koji su ugroženi eksplozivnom atmosferom; radovi na sastavljanju i rastavljanju teških dijelova i/ili sklopova; radovi sa strojevima i uređajima sa povećanim opasnostima; radovi sa skelama (postavljanje, rastavljanje i korištenje); radovi uz odvijanje prometa na cestama i željeznici; radovi na uspinjanju kabela u prednapetim betonskim i drugim konstrukcijama; radovi na betoniranju, rezanju i obradi površina s

napravama s visokim tlakom” (Pravilnik i Dodatak II “Nepotpuni popis posebno opasnih radova”).

U Dodatku II Direktive 92/57/EEZ od 24.6.1992. utvrđen je “kratki popis radova koji uključuju posebne rizike za sigurnost i zdravlje radnika”.

Imajući u vidu navedene radove i odnose, propisani su posebni uvjeti koje mora ispunjavati osoba koju investitor imenuje za koordinatora I i II. Koordinator I “mora imati najmanje završen stručni studij tehničkog smjera (arhitekture, građevinarstva, elektrotehnike i strojarstva) sa stečenim nazivom prvostupnik (baccalaures) inženjer, položen stručni ispit propisan posebnim propisom te položen stručni ispit za koordinatora zaštite na radu. Pravilnik omogućava i alternativna rješenja: ako pravna osoba obavlja poslove koordinatora I ili te poslove obavlja projektant ili glavni projektant, tada radnik pravne osobe odnosno projektant mora ispuniti uvjete predviđene za koordinatora I.

Koordinator II (za zaštitu na radu u fazi izvođenja radova) “mora imati najmanje završen stručni studij tehničkog smjera sa stečenim nazivom prvostupnik (baccalaures) inženjer, položen stručni ispit propisan posebnim propisom te stručni ispit za koordinatora zaštite na radu ili najmanje završen preddiplomski sveučilišni stručni studij smjera sigurnosti i zaštite zdravlja na radu sa stečenim akademskim nazivom sveučilišni prvostupnik (baccalaures) inženjer, položen stručni ispit stručnjaka zaštite na radu te stručni ispit koordinatora zaštite na radu. I ovdje Pravilnik omogućava alternativna rješenja: ako pravna osoba obavlja poslove koordinatora II onda njezin radnik (koji obavlja te poslove) mora ispunjavati propisane uvjete za koordinatora II. To se odnosi i na inženjera odnosno glavnog inženjera gradilišta (čl. 5 i 6).

3.2.1. Plan izvođenja radova

U odredbama Pravilnika kojima se uređuje plan izvođenja radova, propisane su obveze poslodavcu i investitoru. Plan je poseban dokument (akt). “Plan izvođenja radova je sastavni dio projektne dokumentacije određene posebnim propisima.” (čl. 7 st. 4).

Direktiva 92/57/EEZ u odredbama članak 4 daje obveze nadzornom inženjeru (nadzorniku projekta) ili “gdje je prikladno” investitoru i izvođaču (klijentu) da vodi računa o općim načelima prevencije u vezi sa sigurnošću i zdravljem navedenim u Direktivi 89/391/EEZ, za vrijeme različitih faza projektiranja i pripreme projekta “a posebno kad se odlučuje o arhitektonskim, tehničkim i/ili organizacijskim aspektima planiranja različitih dijelova ili faza rada koji će se izvoditi istovremeno ili susljedno (nastavno), te kad se procjenjuje razdoblje potrebno za donošenje takvih radova ili faza rada. To mora osigurati “sve planove sigurnosti i zdravlja” i u navedenim

fazama bilo kakvih narednih radova ali i preinaka plana “koji odgovaraju osobinama projekta. Projektant je fizička osoba – ovlašteni arhitekt ili ovlašteni inženjer. Glavnog projektanta određuje investitor, koji odgovara za “cjelovitost i međusobnu usklađenost projekata...ako u projektiranju sudjeluje više projekatana...” Projekt mora biti usklađen i s posebnim propisima (v. odredbe čl. 190 – 208. Zakona o prostornom uređenju i gradnji).

Obveza investitora je da “prije uspostave gradilišta... osigura izradu plana izvođenja radova”. U plan se unosi (naknadno) “svaka promjena na gradilištu koja može utjecati na sigurnost i zdravlje radnika...” (čl. 7 st. 1, 2 i 3). “Svaki poslodavac koji izvodi radove u trajanju duljem od pet dana dužan je izraditi svoj plan izvođenja radova i odrediti rok dovršetka radova.” (čl. 7 st. 5). U posebnom Dodatku V uz Pravilnik propisan je sadržaj plana izvođenja radova (“Plan izvođenja radova mora sadržavati”): Opis i shemu (nacrt) izvođenja radova u skladu sa zahtjevima iz Dodatka IV ovog Pravilnika (“koji određuje konkretan način ispunjenja zahtjeva) ...; popis opasnih tvari; popis posebno opasnih poslova; opasna radna mjesta i zaštitna oprema i osobna sredstva; Postupak prema komunalnoj infrastrukturi “s mogućnošću hitnog isključenja komunalnih vodova u slučaju nužde”; Postupak za svaku pojedinu opasnu fazu ...; Postupak definiranja izvođenja radova i dokumentacije sa svim promjenama na gradilištu (“usklađivanje”...); Vremenski plan radova; Način organiziranja suradnje i izvješćivanje svih subjekata na gradilištu... “u cilju sprečavanja ozljeda na radu i zaštite zdravlja radnika”; Način organiziranja pristupa na gradilište samo osoba kojima je to dozvoljeno...; Zajedničke mjere zaštite na radu na gradilištu; obveze izvođača da se međusobno informiraju “o tijeku pojedinačnih faza rada”; Pravila ponašanja na gradilištu; Popis poslova s procjenom troškova ... i zajedničke mjere zaštite na radu....; Popis isprava i evidencija i uputa za zaštitu na radu (koje se čuvaju na gradilištu) i potpis odgovorne osobe. U Dodatku IV i V Pravilnika precizira se sadržaj i kod izrade plana izvođenja radova svaki dio se mora navesti obraditi i precizirati (unutarnja i vanjska mjesta rada na gradilištu...).

3.2.2. *Prijava gradilišta*

Direktivom 92/57/EEC propisana je obveza investitora ili izvođača (“klijenta”) ili nadzornika projekta “na dostavljanje prethodne obavijesti nadležnim organima prije početka radova” (čl. 3. st. 3). Ta obveza odnosi se na slučaj da se radi o gradilištima “na kojima je predviđeno da radovi traju dulje od 30 radnih dana i na kojima je istovremeno zaposleno više od 20 radnika ili na kojima je predviđeno da opseg radova premaši 500 osoba – dana”.

Pravilnik obvezuje investitora da prijavi gradilište kao i Direktiva, a “U slučaju izvođenja posebno opasnih radova iz “Dodatka II. ovog Pravilnika (“posebno

opasni radovi”), prijava gradilišta se mora sačiniti bez obzira na trajanje radova i broj radnika koji izvode te radove” (čl. 8 st. 2).

Pravilnikom su propisane i ove obveze u vezi prijave gradilišta: 1. investitor dostavlja prijavu inspekciji rada “odnosno drugom nadležnom tijelu uz dostavu plana izvođenja radova...” Rok za dostavu je 8 dana (“najmanje ...prije početka izvođenja radova.”); 2. ako makar jedan izvođač izvodi “opasne radove” dužan je tijelima i u roku iz točke 1) dostaviti prijavu gradilišta kao i ako radovi traju duže od pet dana...; 3. kopija prijave mora biti vidno izložena na gradilištu; 4. “Prijavu gradilišta dužan je investitor ažurirati u slučaju promjena koje utječu na rok dovršenja radova, kao i slučajevima uvođenja novoga izvođača radova ili privremene obustave rada.” (čl. 8).

3.2.3. Obveze investitora, izvođača i drugih osoba na gradilištu

Sukladno odredbama Direktive 92/57/EEC, Pravilnik, pored već navedenih, uređuje i druge obveze subjekata koji se javljaju na privremenim i pokretnim gradilištima. Koordinatori pripremaju i potiču primjenu “bilo kakve potrebe preinake plana zaštite sigurnosti i zdravlja i dokumentacije za određeno gradilište, kako bi se vodilo računa o napredovanju radova i svim promjenama koje se događaju”. Koordinatori organiziraju suradnju svih izvođača na određenom gradilištu i “koordiniraju njihove djelatnosti radi zaštite radnika i sprečavanja nesreća i ugrožavanje zdravlja na radu, sa zahtjevom za uzajamno informiranje svih. Koordinatori koordiniraju mehanizme kako bi provjerili pravilnu primjenu radnih postupaka te poduzimaju mjere “kako bi se osiguralo da pristup na gradilište imaju samo ovlaštene osobe”.

Bez obzira na imenovanje koordinatora za obavljanje dužnosti u zaštiti na radu, prema navedenoj Direktivi, to ne oslobađa investitora, izvođača i nadzornog inženjera od odgovornosti koje u tom smislu imaju, niti to utječe na načelo odgovornosti poslodavca kako je određeno Direktivom 89/391/EEZ. Takvu odredbu sadrži i Pravilnik u članku 12. Investitor ne može svoje obveze (“propisane ovim Pravilnikom”) primijeti na izvođača (izvođače radova) (čl. 12. st. 3), u skladu s Direktivom 89/391/EEC Pravilnik utvrđuje “osnovne obveze poslodavca”: poduzimanje mjera nužnih za zaštitu sigurnosti i zaštite zdravlja radnika, te prilagođavanje tih mjera “vodeći računa o promjeni okolnosti i težnji poboljšanja postojećeg stanja”, u skladu s načelima: izbjegavanja opasnosti, procjene opasnosti koje se ne mogu izbjeći, suzbijanje opasnosti na njihovom izvoru, prilagođavanje rada opasnostima; prilagodba tehničkom napretku; zamjena opasnih bezopasnim i manje opasnim tvarima; razvijanje sveobuhvatne preventive; davanje prednosti zajedničkim mjerama zaštite pred osobnim; izbjegavanje opasnosti i štetnosti; davanje odgovarajućih uputa radnicima;

provjera opasnosti i povjeravanje poslova radnicima prema utvrđenoj radnoj sposobnosti a privođenje nove tehnologije posebnim opasnostima pristup mogu imati samo obučeni radnici (Direktiva 89/391/EEZ: čl. 6.; ZZR).

Stvorene su obveze poslodavcima gdje njih više “dijele prostor” da usklajuju svoj rad u pogledu zaštite i preventivnih mjera te obavještavaju jedan drugoga i svoje odgovorne radnike o tim opasnostima.” (čl. 14, ZZR).

Subjekti na gradilištu, a izvođač (i) posebno uvažavaju i primjenjuju Načela za održavanje primjerenog rada i zadovoljavajuće čistoće na gradilištu; izbor i izvještaj mjesta rada, uzimajući pri tome u obzir način održavanja pristupnih putova te određivanje smjerova kretanja i površina za prolaz, kretanje ili opremu; uvjete pod kojima se rukuje različitim materijalima; tehničko održavanje, prethodni i redoviti pregledi instalacija i opreme radi ispravljanja svih nedostataka koji mogu utjecati na sigurnost i zdravlje radnika; razmještaj i označavanje površina za skladištenje različitih materijala, posebice kada se radi o opasnim materijalima i tvarima; uvjete pod kojima se koristi i premještaju ili uklanjaju opasni materijali; skladištenje i odlaganje ili uklanjanje otpadaka i otpadnog materijala; usklađivanje vremena izvođenja različitih vrsta radova ili faza rada na temelju odvijanja poslova na gradilištu; suradnja između izvođača i drugih osoba na gradilištu; uzajamnog djelovanja svih aktivnosti na mjestu na kojem se radi ili u blizini kojega se nalazi gradilište (čl. 13 Pravilnika) (Direktiva 92/57/EEZ od 24.06.1992., čl. 8).

Obveze izvođača i drugih osoba na gradilištu “radi osiguranja zaštite na radu na gradilištu” su: 1. primjena načela utvrđenih u članku 13. Pravilnika (vidi prethodnu stranicu ovog rada); 2. poduzimanje mjera koje su u skladu s minimalnim zahtjevima propisanim u Dodatku IV (koji je sastavni dio ovog Pravilnika – Dodatak IV Pravilnika nosi naslov “Minimalni sigurnosni i zdravstveni zahtjevi na gradilištima (navedenim u članku 13. i 14. Pravilnika). Imaju dva dijela (Dio A i dio B). Dio A ima naslov “Opći minimalni zahtjevi za mjesta rada na gradilištu”, a odnose se na: stabilnost i čvrstoću; instalacije za distribuciju energije; evakuacijske putove i izlaze; otkrivanje gašenja požara; provjetravanje; izlaganje posebnim opasnostima; temperatura; prirodna i umjetna rasvjeta mjesta rada, prostora i prometnih putova na radilištu; vrata; prometni putovi – opasna područja; teretne platforme i rampe; omogućavanje slobodnog kretanja na mjestu rada; prva pomoć; sanitarna oprema (garderobe i garderobni ormari, tuševi i umivaonici; nužnici i umivaonici); prostor za odmor i/ili prostorije za smještaj; trudnice i dojilje; radnici s posebnim potrebama (invalidi) i ostale odredbe. “Dio B” ima naziv “Posebni minimalni zahtjevi za mjesta rada na gradilištu” koja se kvalificira (iskazuje) u dva dijela (“unutarnje mjesto rada i vanjsko mjesto rada) što “nije obvezno u iznimnim situacijama”. U “dijelu B”

označen je “DIO I” unutarnja mjesta rada na gradilištu i to: stabilnost i čvrstoća; Nužni izlazi; provjetravanje; temperatura; prirodna i umjetna rasvjeta; podovi, zidovi, stropovi i krovovi prostorija; prozori i svjetlarnici, vrata, prometni putevi, posebne mjere za pokretne stepenice i pokretne trake; veličina prostorija i zračni prostor u prostorijama. U “Dijelu B” označen je “Dio II” vanjska mjesta rada na gradilištu i to: stabilnost i čvrstoća; instalacije za distribuciju energije na gradilištu; atmosferski utjecaji; padajući predmeti; padovi s visine; skele i ljestve; oprema za dizanje i prenošenje; vozila i strojevi za iskopavanje, premještanje, izvlačenje i prijevoz materijala; instalacije, strojevi i opreme; građevinske jame, zdenci (bunari), radovi pod zemljom, tuneli i zemljani radovi; rušenje; metalni ili betonski okviri, oplata i teški montažni elementi; podvodna zvana i kesoni; rad na krovu); 3. uvažavati upute glavnog inženjera gradilišta i/ili koordinatora za zaštitu na radu (čl. 14 st. 1 pod b) Pravilnika).

Obveze se primjenjuju tamo “gdje to zahtijevaju karakteristike gradilišta, aktivnosti, određene okolnosti ili opasnosti, u skladu s propisanim pravilima zaštite na radu”. To uređuje i Direktiva 92/57/EEZ u Dodatku IV (“minimalni uvjeti zaštite sigurnosti i zdravlja na gradilištima” u “dijelovima” “A” i “B”; u “dijelu A” utvrđeni su “opći minimalni uvjeti za radne punktove na gradilištu”, a u “dijelu B”, “Posebni minimalni uvjeti za radne punktove na gradilištima; pod pojmom “prostorija” Direktiva podrazumijeva i smještaj u barakama (“Dodatak IV – prethodne napomene”). Vidi i Direktivu 89/654/EEC o minimalnim zahtjevima za sigurnost i zdravlje na radnom mjestu, od 30.11.1989.

3.3. Obavješćavanje radnika, savjetovanje radnika i sudjelovanje radnika

U članku 15. Pravilnika uređeno je pitanje obavješćavanja radnika na ovaj način: izvođač je dužan na razumljiv način dati radnicima i/ili njihovim predstavnicima “sve potrebne obavijesti o zaštiti na radu na gradilištu i rizicima za sigurnost i zdravlje pri pojedinim radovima”; izvođač je dužan izvještavati radnike i/ili njihove predstavnike “o svim mjerama, koje je poduzeo ili namjerava poduzeti u svezi zaštite na radu na gradilištu.”

Odredbe čl. 31.-35. Zakona o zaštiti na radu odnose se na “obavješćavanje iz zaštite na radu”. To je obveza poslodavca a odnosi se na: zaštitu, sigurnost i zdravlje “u svezi djelatnosti koju obavlja”, postavljanje znakova sigurnosti i znakova općih obavijesti “u skladu s odgovarajućim propisima”. “Nakon smrtne, skupne i teške ozljede na radu, utvrđenog slučaja profesionalne bolesti, kao i nalaza nadležnog tijela kojim je utvrđen nedostatak u primjeni pravila zaštite na radu” odmah, a inače svaka tri mjeseca, poslodavac je dužan izvijestiti povjerenike radnika za zaštitu na radu i druge o poduzetim mjerama. Poslodavac o tome obavještava i radničko vijeće (“o opasnostima i štetnostima po sigurnost i zdravlje

te mjerama koje je poduzeo i koje će poduzeti radi unapređivanja sigurnosti i zaštiti zdravlja”, čl. 33 st. 1 i 2, ZZR).

Savjetovanje i sudjelovanje radnika uređeno je člankom 16. Pravilnika Izvođaču se stvara obveza da se savjetuje s radnicima i/ili njihovim predstavnicima o svim poslovima u vezi zaštite na radu na gradilištu” i to “redovito u određenim rokovima”. To mora omogućiti “radnicima ili njihovim predstavnicima... ravnopravno sudjelovanje”. Povjerenici za zaštitu na radu zastupaju sve radnike. U zaštiti na radu radnička participacija ostvaruje se: obavještanju, savjetovanjem, suodlučivanjem, pregovaranjem i nadzorom. U čl. 17. Direktive 92/57/EEZ utvrđuje se da će se savjetovanje s radnicima i njihovo sudjelovanje odvijati “u skladu s člankom 11. Direktive 89/391/EEZ... uz osiguranje, gdje god je to potrebno, primjerene suradnje između radnika i/ili njihovih predstavnika u poduzećima, koja izvode radove na tom mjestu, uz poštovanje stupnja rizika i veličine gradilišta”. [3]

Navedene odredbe treba uvijek tumačiti zajedno s odredbama propisa o građenju jer je zaštita na radu sastavni dio organizacije rada, pa bez obzira na znanja o građenju za očekivati je, a i zahtjev je da se radi sinkronizirano (koordinirano) kako nadzornog organa investitora, voditelja (i drugih) na gradilištu, tako posebno osoba na koje se ovaj Pravilnik u zaštiti na radu odnosi.

3.4. Zaključak

Direktiva 92/57/EEZ sastavljena je u Luxembourg 24. lipnja 1992. godine i upućena državama članicama EU, “da donesu zakone, propise, i upravne mjere potrebne radi usklađivanja s ovom Direktivom najkasnije do 31. prosinca 1993. godine, te o ovom odmah obavijestiti komisiju EU. Svaki obavljeni propis mora se pozvati na Direktivu i dostaviti komisiji EU. Redovita izvješća države dostavljaju se svake četvrte godine o praktičnoj provedbi ove Direktive “ukazujući na stajališta poslodavaca i radnika. Nakon toga Komisija EU obavještava i podnosi izvještaj Europskom parlamentu, Vijeću EU, Odboru za gospodarstvena i socijalna pitanja te savjetodavnom odboru za zaštitu sigurnosti, higijene i zdravlja na radu.

Sustav zaštite na radu u Republici Hrvatskoj čine odredbe Ustava Republike Hrvatske, univerzalnih vrela u toj oblasti, na snazi u Republici Hrvatskoj (prvenstveno konvencije MOR-a)[4], ZZR i drugi zakon koji se primjenjuje u pojedinim djelatnostima, pa se primjenjuju kao *lex specialis*, te brojni provedbeni (podzakonski) akti kojima se sada “pridružio” i ovaj Pravilnik. To su i brojni autonomni akti kojima se uređuju odnosi u ovoj oblasti (procjena opasnosti, kolektivni ugovori, pravilnici o zaštiti na radu, odluke s općim normama i dr. Taj sustav (uz priznata pravila) je usklađen s Direktivom EU 89/391/EEZ o uvođenju mjera za poticanje unapređenja sigurnosti i zdravlja radnika na radu, koja je okvirna direktiva u ovim odnosima, a sada i sa Direktivom 92/57/EEZ

od 24. lipnja 1992. o osiguranju minimalnih zahtjeva za sigurnost i zdravlje na privremenim i pokretnim radilištima. Posebno se ukazuje na precizno definiranje pojmova: investitor, izvođač, poslodavac, koordinator, nadzorni organ i dr.

Kao i Direktiva 92/57/EEZ, Pravilnik obvezuje na imenovanje koordinatora za pitanje sigurnosti i zdravlja (jednog ili više) za bilo koje gradilište na kojem radi više izvođača, a pogotovo gdje su u pitanju rizični poslovi (bez obzira da li se radi o visokogradnji ili niskogradnji (čl. 56, ZZR). [1], [2], [5]

Investitor i nadzorni organ dužni su izraditi plan zaštite sigurnosti i zdravlja “prije otvaranja gradilišta” i da o tome obavijeste nadležni upravni organ (s točno određenim sadržajem), opet u skladu sa Zakonom o prostornom uređenju i gradnji i provedbenih propisa uz taj Zakon. Uređenje zaštite na radu je obveza i socijalnih partnera. Direktiva 92/57/EEZ obvezuje državu, poslodavca i sindikate da uvedu zaštitu na radu na zajedničkim gradilištima, posebno kada se zapošljavaju mladi radnici početnici i kada se zasniva radni odnos na određeno vrijeme. U ovoj djelatnosti je najveći broj ozljeda na radu (pad s visine, u dubinu i na istoj ravnini, uklještenje između strojeva, alata i sl). “Voditelj građenja dužan je voditi dnevnu evidenciju poslodavca i zaposlenika nazočnih na privremenom zajedničkom gradilištu” (čl. 57 st. 5, ZZR).

Poslodavac je dužan čuvati na gradilištu dokaze o osposobljenosti zaposlenika, dokaze o ispunjavanju uvjeta za obavljanje poslova s posebnim uvjetima rada, dokaze o ispitivanju strojeva i uređaja s povećanim opasnostima i ostalu dokumentaciju potrebnu za izvođenje radova.” (čl. 58, ZZR).

Ovaj posao u ime navedenih subjekata mogu obavljati samo stručnjak sa završenim stručnim studijem tehničkog smjera, inženjeri, sa položenim stručnim ispitom (za koordinatora zaštite na radu), odnosno u fazi građenja (koordinator II) u smjeru zaštite na radu (sa stečenim akademskim nazivom sveučilišni prvostupnik (baccalaures) inženjer, s položenim stručnim ispitom stručnjaka zaštite na radu te stručnim ispitom za koordinatora zaštite na radu. Te uvjete mora ispunjavati inženjer odnosno glavni inženjer gradilišta u funkciji koordinatora II (čl. 5 i 6 Pravilnika).

Za povredu odredbi koje reguliraju zajednička i privremena (pokretna) gradilišta, propisane su stroge kazne za poslodavca: ako na privremenom radilištu ne osigura da se radovi obavljaju sukladno pravilima zaštite na radu, ako ne dostavi plan uređenja gradilišta i dr. (ZZR, čl. 109; u pitanju su prekršajna djela o vođenju evidencija, sklapanju ugovora sa “zajedničkim” izvođačem i dr.).

Pravilnik je stupio na snagu 13. svibnja 2008. godine, ali će se početi primjenjivati “u roku od godine dana od dana njegovoga stupanja na snagu”. To je učinjeno kako bi se brojnim subjektima omogućilo da usklade organizaciju

zaštite na radu sa zahtjevnim odredbama ovog provedbenog (podzakonskog) akta (propisa).

Do početka primjene ovoga Pravilnika važe odredbe Pravilniku o sadržaju plana uređenja privremenih i zajedničkih privremenih radilišta (NN 45/84) i Pravilnika o osiguranju smještaja, prehrane i prijevoza radnika koji obavljaju poslove na privremenim radilištima izvan sjedišta organizacije odnosa poslodavca (NN 7/87) u odnosu na građevinske ili montažne radove”.

4. Uvjeti i stručna znanja za imenovanje koordinatora za zaštitu na radu

Kako je već navedeno Pravilnik uređuje (propisuje) uvjete i stručna znanja za imenovanje koordinatora za zaštitu na radu, u skladu sa Zakonom o zaštiti na radu, Zakonom o prostornom uređenju i gradnji, Zakonom o arhitektonskim i inženjerskim poslovima i djelatnostima u prostornom uređenju i gradnji, NN 152/08, direktivama EU i drugim propisima (navedenim u ovom radu).

Pojmove koordinatora za zaštitu na radu (I i II). odredili su navedeni propisi (ZZR, čl. 57 i 57a; Direktiva Vijeća 92/57/EEC čl. 2. i 3.; Pravilnik o zaštiti na radu na privremenim i pokretnim gradilištima, čl. 10. i 11. “Koordinator za zaštitu na radu može obavljati poslove koordinacije kod investitora, glavnog projektanta i poslodavca, kao koordinator za zaštitu na radu u fazi izrade projekta – Koordinator I i koordinator za zaštitu na radu u fazi izvođenja radova – Koordinator II.” (čl. 2 Pravilnika).

U članku trećem Pravilnik propisuje uvjete stručne spreme i stručna znanja koordinatora I. On “mora imati najmanje završen stručni studij tehničkog smjera (arhitekture, građevinarstva, elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje) sa stečenim stručnim nazivom prvostupnik (baccalaures) inženjer, položen stručni ispit propisan posebnim propisima iz graditeljstva te položen stručni ispit za koordinatora zaštite na radu.” (Pravilnik o stručnom ispitu te upotpunjavanju i usavršavanju znanja osoba koje obavljaju poslove prostornog uređenja i graditeljstva, NN 24/08).

Zahtjevi su precizni i zahtjevni. Najveći broj koordinatora I (u fazi izrade projekta) radi na poslovima projektiranja (projektant, nadzorni inženjer, suradnici) (Zakon o arhitektonskim i inženjerskim poslovima i djelatnostima u prostornom uređenju i gradnji, Glava III). Koordinator I koji je položio stručni ispit po posebnim propisima iz graditeljstva i stručni ispit po posebnom propisu iz zaštite na radu” ne mora polagati stručni ispit za koordinatora I, po ovom Pravilniku. “Koordinator I može obavljati poslove koordinatora II” (čl. 5 ovog Pravilnika) (Pravilnik o zaštiti na radu na privremenim i pokretnim gradilištima, NN 51/2008:

čl. 8. i 9.). Poslovi koordinatora I (u fazi izrade projekta) i poslovi koordinatora II (u fazi izvođenja radova) propisani su Zakonom i pravilnicima.

Pravo na polaganje stručnog ispita za koordinatora I imaju osobe koje ispunjavaju uvjete iz članka 3. i članka 6. Pravilnika, a za koordinatora II, ako ispunjavaju uvjete iz članka 4. i članka 7. Pravilnika. "Ispitni program" za stručni ispit jedinstven je za koordinatora I i koordinatora II (Pravilnik, čl. 8. Dodatak I). Kandidat prijavljuje stručni ispit ministarstvu nadležnom za rad uz dokaze da ispunjava uvjete koji su propisani ovim Pravilnikom. "Ministar nadležan za rad rješenjem odobrava polaganje stručnog ispita." (Pravilnik, čl. 9. i 10.) Kandidat mora udovoljiti pozivu ministarstva da "dostavi potrebnu dokumentaciju" inače će se smatrati da je "odustao od polaganja ispita". Propisano je vrijeme i način obavještanja kandidata o polaganju ispita i posljedice ne izlaska na ispit (čl. 10. st. 2. i 3.) (Pravilnik, čl. 9. i 10.) Kandidat mora ministarstvu "dostaviti potrebnu dokumentaciju" inače će se smatrati da je "odustao od polaganja ispita". Stručni ispit polaže se pred ispitnim povjerenstvom od tri člana kojega imenuje odlukom ministar nadležan za rad. Uvjeti za članove povjerenstva i predlagači članova povjerenstva utvrđeni su u članku 12 Pravilnika. Stručni ispit polaže se usmeno. Ocjenjuju se pojedini predmeti ("zadovoljio" ili "nije zadovoljio") a uspjeh na stručnom ispitu ocjenom "položio" odnosno "nije položio". Kandidat koji nije položio ispit ima ga pravo polagati po proteku 30 dana, "a ispit ima pravo polagati najviše tri puta". Popravni ispit može polagati kandidat iz samo jednog ispitnog predmeta (čl. 15-18). "O položenom stručnom ispitu Ministarstvo izdaje uvjerenje" na posebnom obrascu i potpisuje ga predsjednik ispitnog povjerenstva. Ministarstvo vodi Registar izdanih uvjerenja prema propisanom obrascu (Pravilnik, čl. 19 i 20., Obrazac SIK-4 je sastavni dio Pravilnika). Troškovi ispita padaju na teret kandidata ili njegovog poslodavca, a visinu utvrđuje ministar rješenjem. Propisan je način plaćanja troškova za odlaganje ispita, odnosno troškovi popravnog ispita. Članovi povjerenstva imaju pravo na nagradu za rad (čl. 21 i 22).

5. Dodaci Pravilniku

Pravilnik ima pet (5) "Dodataka". "Dodatak 1. – Sadržaj programa stručnog ispita za koordinatora za zaštitu na radu", utvrđuje što taj Program "mora sadržavati" (propisi o zaštiti na radu i o gradnji građevina; dužnosti koordinatora za zaštitu na radu; otklanjanje i smanjivanje rizika na radu; primjena pravila zaštite na radu u fazi pripreme projekta; primjena pravila zaštite na radu u fazi izvođenja projekta ("opći ciljevi", "osnovni sadržaj programa za osposobljavanje"); dužnosti koordinatora za zaštitu na radu; otklanjanje i smanjenje rizika na radu; primjena pravila zaštite na radu ... ("u fazi pripreme projekta" i "u fazi izvođenja projekta"). Tu je i "Mjera za

siguran rad”). “Dodatak 2” precizno utvrđuje “Obrazac SIK-1 zahtjev za polaganje stručnog ispita za koordinatora za zaštitu na radu” (“redni broj”, “podatak”, “priloženi dokumenti” i “potpis kandidata”). “Dodatak 3” je obrazac SIK-2 “Zapisnik o stručnom ispitu”. “Dodatak 4 SIK-3 “Uvjerenje o položenom stručnom ispitu” i “Dodatak 5 – Tablica SIK-4” “Registar izdanih uvjerenja”.

6. Zaključak

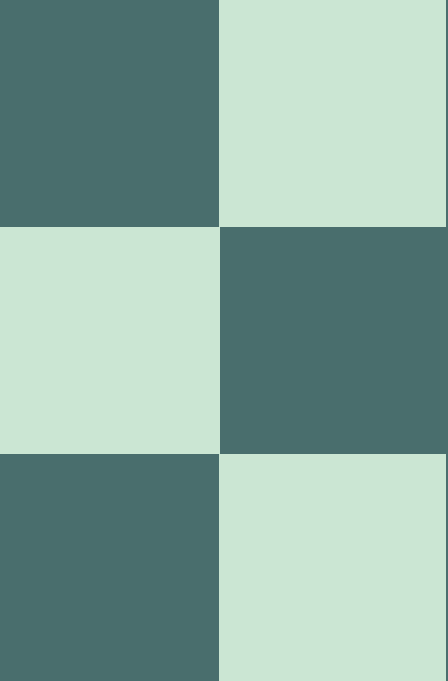
6.1. U vrlo zahtjevnim, složenim pa i opasnim, za život i zdravlje radnika, djelatnostima u građenju postoje suvremeni propisi u oblasti zaštite na radu, kao “sastavnog” dijela te djelatnosti. Zbog toga propise u djelatnostima prostornog uređenja i gradnje, arhitektonskim i inženjerskim poslovima treba u okviru zaštite na radu tumačiti i primjenjivati zajedno s propisima zaštite na radu (nacionalnim, regionalnim i univerzalnim). To se odnosi i na propise o koordinatorima za zaštitu na radu kod investitora, glavnog projektanta i poslodavca.

6.2. Sastavni dio projektne dokumentacije je i projekt zaštite na radu. To moraju raditi specijalisti, inženjeri za određeni dio projekta. To je još naglašenije u fazi izvođenja radova. Propisi o građenju će se bolje primjenjivati uz dosljedniju primjenu propisa u zaštiti na radu. Pored inženjera na gradilištu (voditelja, nadzornih inženjera i dr.) nezamjenljiva je funkcija inženjera zaštite na radu i koordinatora II u toj fazi. To zahtijeva određenu stručnu spremu, radno iskustvo i položen stručni ispit. To je javnopravna karakteristika ovog statusa i odnosa. Država mora imati ulogu donosioca norme, subjekta u realiziranju i u nadzoru tih normi. To se u ovome radu objašnjava analizom i komentarom relevantnih propisa koji su u radu navedeni.

6.3. Zakon o zaštiti na radu ne isključuje odgovornost poslodavca za neprovođenje zaštite na radu i štetne posljedice. To se odnosi i na odgovornost investitora bez obzira da li je “samo investitor” ili je “investitor-izvođač radova”, kao za izvođača radova u smislu Zakona o arhitektonskim i inženjerskim poslovima i djelatnostima u prostornom uređenju i gradnji. Bez obzira što se javljaju osobe odgovorne za zaštitu na radu (stručnjak zaštite na radu, ovlaštenici poslodavca, koordinatori) koji odgovaraju kao odgovorne osobe (disciplinski, prekršajno i kazneno za štetu) odgovornost poslodavca (investitora odnosno izvođača) se ne može isključiti. U tom smislu potrebno je u procjenama opasnosti na radu u zajedničkim građenjima, ugovorima to urediti. Sudionici u gradnji nisu ekskulpirani za te odgovornosti bez obzira na koordinatora, kako je u radu i navedeno.

7. Literatura

- [1] Učur, Marinko, Radno pravo i pravo zaštite na radu, Rad i sigurnost, 3.1999.: 1. 37 – 59.
- [2] Učur, Marinko, Građevinska regulativa (skripta I.) Građevinski fakultet, Rijeka, 2004.
- [3] Učur, Marinko, Osnove prava i zakonodavstvo sigurnosti, Veleučilište, Rijeka, 2005.
- [4] Učur, M. i Laleta, S., Konvencije Međunarodne organizacije rada s komentarom, Tim-press, Pravni fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2007.
- [5] Učur, M., Građevinska regulativa (skripta II.), Građevinski fakultet, Rijeka, 2007.
- [6] Direktiva 92/57/EEZ od 24.06.1992.
- [7] Pravilnik o uvjetima i stručnim znanjima za imenovanje koordinatora za zaštitu na radu te polaganje stručnog ispita, NN br. 101/09, 40/10.
- [8] Zakon o zaštiti na radu, NN br. 59/96, 94/96, 114/03, 100/04, 86/08, 116/08 i 75/09.
- [9] Zakon o prostornom uređenju i gradnji, NN br. 76/07, 38/09.
- [10] Zakon o arhitektonskim i inženjerskim poslovima i djelatnostima u prostornom uređenju i gradnji, NN br. 152/08.



ISSN 0350-8552

9 770350 855209