

GRAĐEVINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTA U RIJECI



Zbornik radova

XII

Rijeka, 2009.

ZBORNİK RADOVA SVEUČILIŠTA U RIJECI
MANUALIA UNIVERSITATIS STUDIORUM FLUMINENSIS



GRAĐEVINSKI FAKULTET
Sveučilišta u Rijeci

Izdavač:

Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, V. C. 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

Nevenka Ožanić

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 978-953-6953-20-2

GRAĐEVINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTA U RIJECI

ZBORNİK RADOVA

KNJIGA XII

Rijeka, listopad 2009.

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

Feriz Adrović
Željko Arbanas
Gojko Balabanić
Lana Buha
Mladen Bulić
Diana Car-Pušić
Marijana Cuculić
Zlatan Cuculić
Mehmed Čaušević
Aleksandra Deluka-Tibljaš
Nevena Dragičević
Gordan Jelenić
Barbara Karleuša
Paulina Katavić
Nives Klobučar
Ivica Kožar
Nino Krvavica
Ivan Marović
Marin Mijalić
Duško Obradović
Nevenka Ožanić
Joško Ožbolt
Edita Papa
Bećo Pehlivanović
Goran Periškić
Lidija Pletenac
Ivica Plišić
Boris Podobnik
Nenad Ravlić
Dragan Ribarić
Josip Rubinić
Davor Sergio
Iva Šarić
Nikola Štefanec
Neira Torić
Goran Volf
Elvis Žic

RIJEČ DEKANA

Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci je u težnji da ostavi trajni dokaz znanstvenog, nastavnog i stručnog rada svojih djelatnika i studenata još 1972. godine započeo s izdavanjem Zbornika radova. Nakon dulje pauze, koja je trajala od 1994. do 2008. godine, ova je praksa obnovljena 2008. godine kada je izdana i promovirana Knjiga XI Zbornika radova Građevinskog fakulteta u Rijeci s ukupno 11 radova. Veseli činjenica da je poziv na objavu rada u ovogodišnjem Zborniku prihvatio veći broj nastavnika te je broj radova ove godine 15, broj autora 37, a uočljiv je i veći broj autora izvan Fakulteta.

Već u prvom obnovljenom Zborniku mogla se uočiti raznolikost znanstvenih i nastavnih interesa nastavnika i suradnika zaposlenih na Fakultetu kao i zajednička težnja da kroz Zbornik prve korake prema znanstvenom promišljanju građevinarstva učine studenti Fakulteta. Uključivanje studenata u provedbu znanstvenih i stručnih projekata i istraživački rad općenito jedan je od važnih elemenata za razvoj sustava visokog obrazovanja koji se kao cilj ističe i u Strategiji Sveučilišta u Rijeci 2007-2013. te će Fakultet u tom smjeru nastojati i dalje djelovati.

Iako živimo u eri elektroničkih medija i zapisa, potreba trajnog bilježenja naših dostignuća na list papira je još vrlo izražena te se nadam da, u tom smislu, budućnost našeg zbornika nije upitna što me i osobno veseli.

Koristim priliku da se zahvalim glavnom uredniku Knjige XII, prof. dr. Gordanu Jeleniću, koji je svoj zadatak obavio vrlo odgovorno te time doprinio kvaliteti ovog izdanja Zbornika.

I na kraju, željela bih čestitati svim autorima ovogodišnjih radova, a posebno onima koji u Knjizi XII Zbornika Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci ove godine objavljuju svoj prvi znanstveni ili stručni rad.

Dekan:

Prof.dr. Aleksandra Deluka-Tibljaš

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 namjena Zbornika jest da omogućiti objavljivanje radova studenata završnih godina preddiplomskoga i diplomskoga studija uz mentorsko vođenje nastavnoga osoblja Fakulteta, kao i samostalnih i zajedničkih radova nastavnog osoblja, doktoranata, vanjskih suradnika i ostalih znanstvenika i stručnjaka.

Zbornik radova Građevinskoga fakulteta Sveučilišta u Rijeci nije indeksirana publikacija i u njemu je moguće predstaviti proširenu verziju drugdje objavljenog rada, ali taj rad u sebi mora sadržavati značajan udio rezultata koji ranije nisu bili objavljeni. U ovome izdanju Zbornika predstavljeno je petnaest takvih radova iz područja geotehnike, hidrotehnike, fizike, matematike, didaktike, mehanike, organizacije građenja, prometnica, materijala i numeričkog modeliranja.

U odnosu na prošlogodišnje, specifičnosti ovogodišnjega izdanja su, pored hrvatskoga, uvođenje objavljivanja i na engleskome jeziku te anonimno istorazinsko recenziranje od strane najmanje dvoje stručnjaka. Urednički odbor namjerava i u narednim izdanjima poticati objavljivanje radova na engleskome jeziku i ustrajati na anonimnom istorazinskom recenziranju svih pristiglih radova. 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. Sve primjedbe recenzenata bile su motivirane željom za unapređenjem kvalitete originalnih verzija radova i veseli me što mogu reći da su autori objavljenih radova na takav način recenzije i prihvatili. Kao i prošle, i ove godine Zbornik izlazi u crno-bijeloj tehnici, a na potrebu za tiskom u boji, koja je kod nekih radova izraženija, odgovoreno je izradom priloženom CD-a, koji sadrži cjelokupan tekst Zbornika uključujući i originalne ilustracije u boji.

Koristim ovu priliku da se zahvalim svim autorima na odabiru Zbornika radova Građevinskoga fakulteta Sveučilišta u Rijeci kao medija za objavu svojih rezultata, kao i svim recenzentima na vremenu, trudu i predanosti prilikom stručnog ocjenjivanja pristiglih radova. Svojim stavom i pristupom poslu, autori i recenzenti su dali značajan doprinos kako kvaliteti ovogodišnjega izdanja Zbornika, tako i kontinuiranom uspjehu ove godišnje publikacije Fakulteta, pa time i ukupnome razvoju Građevinskoga fakulteta Sveučilišta u Rijeci.

SADRŽAJ

<i>Nevena Dragičević, Barbara Karleuša, Nives Klobučar, Zlatan Cuculić, Davor Sergo</i>	
Pregled novih tehnologija i materijala u kućnim hidroinstalacijama	11
<i>Nino Krvavica, Nenad Ravlić</i>	
Nekonzervativni pristup projektiranju gatova na izloženoj lokaciji	35
<i>Marin Mijalić, Goran Volf, Nevenka Ožanić</i>	
Određivanje hidrograma otjecanja korištenjem HEC – HMS programa	55
<i>Ivica Plišić</i>	
Vodoopskrbni sustav Rijeka – vodoopskrbni podsustav Krk	87
<i>Nikola Štefanec, Josip Rubinić</i>	
Usporedba režima pronosa suspendiranog nanosa rijeka Save i Drave	113
<i>Elvis Žic, Goran Volf, Duško Obradović</i>	
Utjecaj oscilacija vodnih masa u vodospremi na hidrauličke gubitke u vodoopskrbnim sustavima	125
<i>Bećo Pehlivanović, Feriz Adrović, Iva Šarić, Boris Podobnik</i>	
Indoor radon concentration measurement in municipality of Bihać	149
<i>Lidija Pletenac</i>	
E-učenje u službi kvalitete nastave geometrije Iskustva na građevinskom fakultetu	157
<i>Lidija Pletenac</i>	
Svojstva ploha 4. reda (kvartika) primjenljivih u graditeljstvu	177
<i>Dragan Ribarić, Edita Papa, Gordan Jelenić</i>	
Primjena vezane interpolacije na konačne elemente Mindlinovih ploča	191
<i>Lana Buha, Diana Car-Pušić, Ivan Marović</i>	
Procjena troškova uklanjanja postojeće i izvedbe nove armiranobetonske konstrukcije lansirne rampe za ispitivanje torpeda u Rijeci	217
<i>Marijana Cuculić, Željko Arbanas, Aleksandra Deluka-Tibljaš</i>	
Deformacijske značajke nevezanih zrnatih materijala	231

<i>Paulina Katavić, Mladen Bulić, Mehmed Čaušević</i> Aerodinamika visokog čeličnog stupa nosača rasvjete prema europskoj normi	255
<i>Joško Ožbolt, Gojko Balabanić, Goran Periškić</i> Effect of damage on chloride penetration profiles in concrete structures	283
<i>Neira Torić, Gojko Balabanić, Ivica Kožar</i> Numerička analiza prodora klorida u armiranobetonski stup sa vremenski ovisnim rubnim uvjetima	293

Pregled novih tehnologija i materijala u kućnim hidroinstalacijama

Overview of new technologies and materials in water supply and sewage house installations

Nevena Dragičević*, Barbara Karleuša*, Nives Klobučar**,
Zlatan Cuculić*, Davor Sergio*

Sažetak. U radu je dan prikaz tehnologija i materijala koji se primjenjuju u novije vrijeme u kućnim hidroinstalacijama, a čija je primjena unaprijedila izvođenje, kontrolu i korištenje tih instalacija.

Opisani su različiti noviji materijali od kojih se izvode instalacije dovoda pitke hladne i tople vode, kao i odvodnje otpadnih i oborinskih voda. Detaljnije je prikazano područje novijih tehnologija za mjerenje potrošnje vode dopremljene javnim sustavom vodoopskrbe, grijanje vode, zbrinjavanje otpadnih i oborinskih voda na područjima gdje nije izgrađen kanalizacijski sustav, kao i sekundarno korištenje oborinske vode.

Ključne riječi: kućne hidroinstalacije, nove tehnologije, novi materijali

Abstract. New technologies and materials used in most recent times for water supply and sewage house installations are presented in this paper. Their application has improved the process of installation, control and usage of those installations.

Modern materials that are used for cold and hot water supply, waste and storm water drainage installations are described. New technologies for water quantity measurement, water heating, management of waste and storm water in areas without a municipal sewerage system and also reuse of storm water, are also presented.

Key words: house hydroinstallations, new technologies, new materials

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, V.C. Emina 5, 51 000 Rijeka
E-mail: barbara.karleusa@gradri.hr, nevena.dragicevic@gradri.hr

** Institut građevinarstva Hrvatske PC Rijeka, Vukovarska 10a, 51 000 Rijeka
E-mail: nives.klobucar@igh.hr

1. Uvod

Odgovarajućim priključcima kućnih hidroyinstalacija na javne sustave vodoopskrbe i odvodnje danas je osiguran visok standard življenja, barem u tom segmentu, većini stanovnika u Hrvatskoj. Pobjlšanju standarda doprinijela je također i primjena novih materijala, tehnologija, kao i pristupa kod izvodenja kućnih hidroyinstalacija, priključaka na komunalnu infrastrukturu i općenito gospodarenja vodnim resursima. Primjenom nekih od navedenih unapređenja moguće je doprinijeti i kakvoći življenja u naseljima gdje još nije riješena odvodnja priključcima na javnu komunalnu infrastrukturu, kao i osigurati racionalnije korištenje vodnih resursa i njihovu zaštitu od zagađenja (npr. zadržavanjem kišnice i njezinim ponovnim korištenjem, obradom otpadnih voda malim individualnim uređajima za pročišćavanje prije upuštanja u obližnje prijemnike i sl.).

Neki od najznačajnijih novih materijala, tehnologija i pristupa u izvodenju i korištenju kućnih hidroyinstalacija prezentirat će se ukratko u ovom radu.

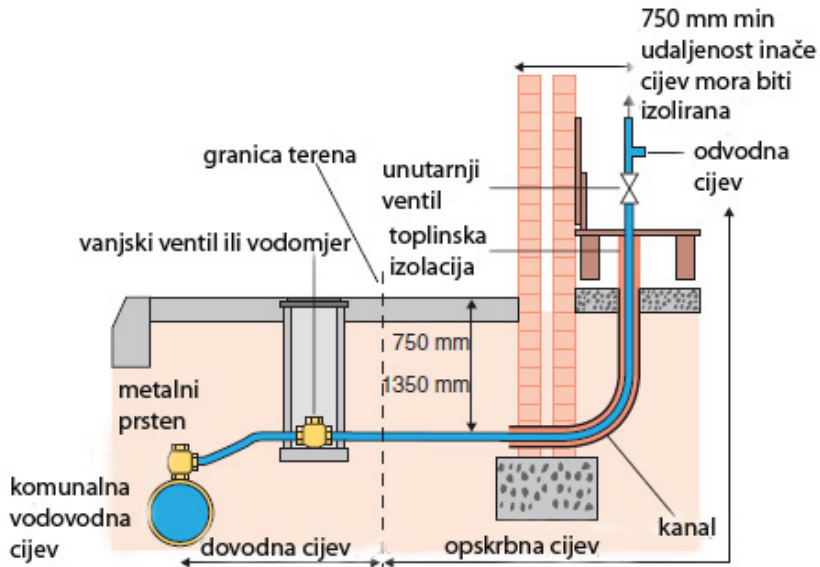
2. Kućne instalacije za dovod vode

2.1. Instalacije za dovod hladne vode

Razvod pitke vode za pojedini objekt ili grupu zgrada, počinje od gradskog vodoopskrbnog cjevovoda te se dalje distribuira spojnim vodom do vodomjernog okna. Izuzetak su naselja u kojima nije izveden javni vodoopskrbni sustav gdje se za vodoopskrbu jednog ili više objekata obično koristi atmosferska voda (kišnica) sakupljena sa nakapnih površina ili se voda dovozi autocisternama i sprema u rezervoare-cisterne iz kojih se najčešće korištenjem hidrofora transportira do svih izljevniha mjesta u objektu ili objektima. Treba napomenuti da je kišnicu potrebno tretirati prije upotrebe (filtriranje, dezinfekcija).

Kućne priključke postavljaju i održavaju djelatnici komunalnog vodovoda dok se vodovod od kućnog priključka dalje izvodi i održava na račun vlasnika objekta. Pod kućnim vodovodom podrazumijevamo instalaciju vodoopskrbnih cjevovoda u samoj zgradi i njen pripadajući dio u dvorištu. Na slici 1 prikazan je razvod vode od komunalne vodovodne cijevi do objekta.

Instalacije dovoda i razvoda hladne vode unutar zgrada značajno su unaprijeđene primjenom novih materijala i tehnologija. Danas se koriste nove tehnologije za mjerenje potrošnje vode, novi materijali od kojih se izvodi sama mreža (cijevi) kao i moderniji sanitarni uređaji (tuševi, hidromasažne kade i sl.).



Slika 1. Kućni priključak s vodomjerom [3]

Vodomjeri su uređaji za mjerenje protoka vode, kontrolu i obračun potrošnje vode, a sastoje se od mjernog i pokaznog uređaja. Za mjerenje potrošnje hladne vode svrstavaju u mjeriteljske razrede A, B i C (tablica 1) ovisno o vrijednosti najmanjeg (Q_{\min}) i prijelaznog protoka (Q_t). Nazivni protok jednak je polovici najvećeg protoka vode [6].

Tablica 1. Podjela vodomjera za hladnu vodu od 0-30°C prema mjeriteljskim razredima [6]

MJERITELJSKI RAZRED		NAZIVNI PROTOK Q_n	
		<15 m ³ /h	>15 m ³ /h
A	Q_{\min}	0,04 Q_n	0,08 Q_n
	Q_t	0,10 Q_n	0,30 Q_n
B	Q_{\min}	0,02 Q_n	0,03 Q_n
	Q_t	0,08 Q_n	0,20 Q_n
C	Q_{\min}	0,01 Q_n	0,006 Q_n
	Q_t	0,015 Q_n	0,015 Q_n

U klasične mjerne uređaje spadaju vodomjeri s krilastim rotorima, oscilatorni vodomjeri, Voltmanov vodomjer, Venturijev vodomjer, te kombinirani vodomjeri koji su najčešće spoj vodomjera s krilastim rotorom i Voltmanovog vodomjera.

Najveći nedostatak klasičnih vodomjera je manja točnost pri očitavanju koje se vrši isključivo na licu mjesta.

U posljednje vrijeme došlo je znatnog tehničkog razvoja u mjerenju potrošnje vode zbog korištenja novih tehnologija kao što je Meter-Bus (M-Bus), novi europski standard za daljinska očitavanja potrošnje vode [17]. Sustav M-Bus omogućuje očitavanje većeg broja vodomjera sa jedne pozicije. Za ispravan rad sustava potrebno je ugraditi vodomjere (slika 2) sa impulsima ili sa već ugrađenim M-Bus registrima, M-Bus stanice sa ili bez pretvarača impulsa, modem, radijski odašiljač, prijemnike te prema odabranom nivou automatizacije i svu ostalu pripadajuću opremu. Prednosti ovog sustava su brzo očitavanje bez pogreške, prezentiranje očitanih vrijednosti u čitljivom formatu, koji se dalje može obrađivati, manji troškovi zbog daljinskog očitavanja, nepotrebnost ulaska u privatne prostore stanovnika te lociranje brojača koji se nalazi na nedostupnom mjestu. Standardizacija M-Bus sustava omogućila je korištenje mjernih uređaja različitih proizvođača.



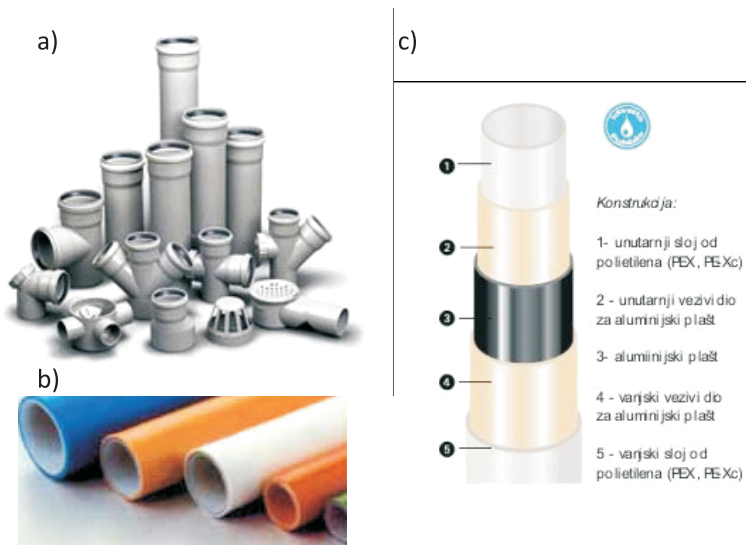
Slika 2. Primjer M-Bus vodomjera – tip MO-R [29]

Ekonomskim i tehničkim unaprjeđenjem M-Bus sustava i svih pratećih uređaja omogućen je veći broj krajnjih uređaja, mogućnost proširenja kompletne mreže, fizička otpornost, smanjenje troškova, veća brzina prijenosa podataka i sl. [5].

Unaprjeđenje sustava dovoda vode i odvoda otpadne vode može se povezati s otkrićem i primjenom novih sintetičkih materijala.

Nakon odbacivanja lijevanoželjeznih cijevi zbog premale fleksibilnosti te olovnih i bakrenih cijevi zbog štetnih utjecaja na zdravlje, čelične pocinčane cijevi godinama su bile primarni izbor za izvođenje kućnih vodovodnih instalacija. Međutim, cijevi od plastičnih masa (PVC, PE, PEX – umreženi polyethylene, PP – Polypropylene, PES- Polyester) su se pokazale kao gotovo savršene za ovu

namjenu: ne korodiraju, ne mijenjaju okus pitke vode, lagane su za transport, jednostavne za ugradnju i spajanje te sigurne s aspekta vodonepropusnosti. Na tržištu već postoje PE cijevi treće i četvrte generacije. Koriste se i PEX cijevi (od umreženog polietilena). Riječ je o proizvodu visoke tehnologije u kojem dugački molekularni lanci oblikuju cijev, a posebna tehnika ozračivanja snopovima elektrona osigurava im trajnost, stabilnost i žilavost [8]. Umrežene su molekule pa cijev može podnijeti vrlo visoke tlakove. Nažalost jedna od najvećih zamjerki cijevi od sintetičkih plastičnih materijala je teško lociranje u zidovima te stoga lako oštećivanje. Upravo zbog tih problema, osmišljene su i proizvedene cijevi koje ujedinjuju pozitivne osobine PE i PEX materijala. To su višeslojne cijevi stabilizirane aluminijskim umetkom između dva sloja iz random polipropilena (PP-R), mrežastog polietilena (PEX) (slika 3) ili iz polibutena (PB), nazvane PAP cijevima (PEX-AL-PEX ili višeslojne cijevi) te kompozitne cijevi koje su stabilizirane mješavinom vlakana u srednjem sloju i češće se koriste u sustavima grijanja.



Slika 3. Primjeri cijevi za potrebe vodoopskrbe
(a – PVC cijevi, b – PE cijev, c – PAP cijevi) [13,23,24]

2.2. Instalacije za dovod tople vode

Iako grijanje spada u strojarske instalacije, pri projektiranju vodovoda i kanalizacije potrebno je znati osnovne informacije o principu rada te o osnovnim zakonitostima pripadajuće cijevne mreže. Topla voda se uglavnom proizvodi na mjestu gdje se i troši. Hladna voda se dovede do grijača, u njemu se zagrije te se kao topla voda neposredno ispušta iz samog aparata ili se kratkim cijevnim vodom dovodi do potrošnog mjesta [1]. Za grijanje vode danas se najčešće koriste

električni i plinski bojleri međutim treba napomenuti da se u nekim urbanim sredinama, topla voda dovodi do objekata iz toplana te se njezina potrošnja treba mjeriti odgovarajućim vodomjerima.

Vodomjeri za mjerenje potrošnje tople vode mogu se svrstati u četiri mjeriteljska razreda A, B, C i D po istom principu kao što je objašnjeno za mjerenje potrošnje hladne vode čiji se vodomjeri svrstavaju u svega tri mjeriteljske grupe (tablica 2).

Tablica 2. Podjela vodomjera za toplu vodu od 30-90°C prema mjeriteljskim razredima [6]

MJERITELJSKI RAZRED		NAZIVNI PROTOK Q_n	
		<15 m ³ /h	<15 m ³ /h
A	Q_{min}	0,04 Q_n	0,08 Q_n
	Q_t	0,10 Q_n	0,20 Q_n
B	Q_{min}	0,02 Q_n	0,04 Q_n
	Q_t	0,08 Q_n	0,15 Q_n
C	Q_{min}	0,01 Q_n	0,02 Q_n
	Q_t	0,015 Q_n	0,10 Q_n
D	Q_{min}	0,01 Q_n	
	Q_t	0,015 Q_n	

Uz klasične postupke grijanja vode korištenjem električnih ili plinskih manjih bojlera smještenih u samoj kupaonici ili u neposrednoj blizini korištenja tople vode, moguće je zagrijavanje vode ostvariti u kotlovnici objekta uz pripremu vode za centralno grijanje prostorija i transportirati do svih potrošnih mjesta. Zagrijavanje vode za potrebe grijanja može biti ostvareno korištenjem električne energije, plina, lož-ulja, drva i sl.

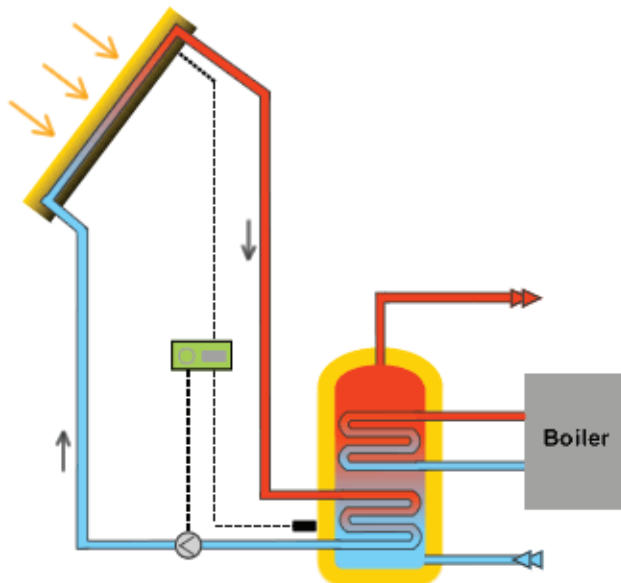
Novije tehnologije u pripremi tople vode podrazumijevaju primjenu solarnih sustava. Primjena solarne tehnologije je u porastu u zadnjih dvadesetak godina pogotovo u onim dijelovima Hrvatske gdje je mnogo sunčanih dana tijekom godine iako su solarni kolektori na krovovima sve su češći prizor i u kontinentalnim krajevima.

Solarni sustav za zagrijavanje vode (slika 4) sastoji se od solarnih kolektora, spremnika topline i ostale opreme (pumpe, termostata, cijevi, itd.). Sam solarni kolektor je izolirana kutija s jednom prozirnou stranicom u kojoj se nalaze cijevi kroz koje prolazi voda. Na cijevima se nalaze limena krilca koja su obojana u crnu boju. Na taj način sunčevo svjetlo ulazi kroz prozirnou stranicu i udara o crnu limenu površinu te se pretvara u toplinsku energiju. Pritom se lim zagrijava, a kako

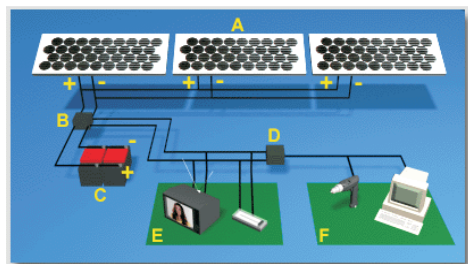
je fizički spojen s cijevima, zagrijavaju se i same cijevi, grijući tako vodu koja prolazi kroz njih. Zagrijana voda se zatim odvodi u spremnik gdje se akumulira. Ako se solarni sustav nalazi u podneblju gdje zimi temperature padaju ispod 0°C , umjesto vode kroz kolektore prolazi mješavina sa sredstvom protiv smrzavanja. Zatim se ta mješavina odvodi u spremnik gdje pomoću izmjenjivača topline predaje energiju vodi unutar spremnika. Ohlađena mješavina se pumpa nazad u kolektor gdje se ponovo zagrijava. Za potrebe jednog kućanstva dostatan je manji solarni sustav koji se sastoji od 2 do 4 m^2 površine kolektora i spremnik za vodu od oko 200 do 300 litara. Međutim isplati se instalirati i veći sustav od npr. 10 do 12 m^2 površine kolektora sa spremnikom od 750 do 1000 litara. Takav sustav može i zimi akumulirati dovoljno energije da se može spojiti na centralno grijanje te na taj način smanjiti račun za grijanje. Ovakav način grijanja zovemo aktivnim solarnim grijanjem [7].

Solarna oprema je prilično skupa te je to vjerojatno glavni razlog zašto se ova tehnologija još uvijek ne koristi u skladu sa svojim potencijalima (slika 5). U nekim državama moguće je dobiti porezne olakšice prilikom kupnje solarne opreme. U kombinaciji s edukacijom ova tehnologija bi mogla napokon zaživjeti i u većem obimu nego je danas prisutna.

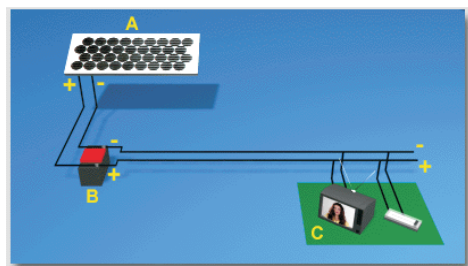
Također, u novogradnjama sve je veća primjena pripreme tople vode kombinacijom različitih energija (npr. solarne energije sa električnom, plinskom ili nekom drugom energijom).



Slika 4. Priprema tople vode solarnim sustavom [25]



- A. Jedan ili više solarnih modula.
- B. Regulator punjenja akumulatora
- C. Baterijski sustav
- D. Pretvarač: napona (12V u 220V)
- E. Tipični potrošači na 12 V DC.
- F. Tipični potrošači na 220 V, 50 Hz.



- A. Solarni modul.
- B. Baterija.
- C. Tipični potrošači na 12 V DC.

Solarni modul: pretvara sunčevo zračenje u električnu energiju.

Slika 5. Primjer primjene solarne energije u kućanstvu

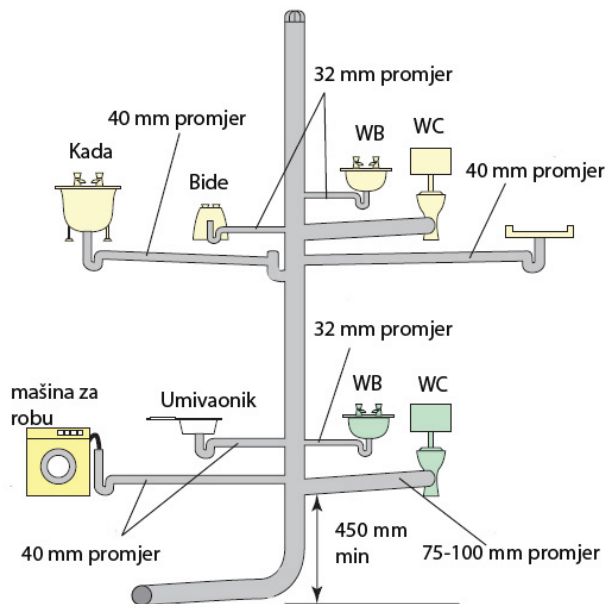
3. Kućne instalacije odvoda vode

Osnovni zadatak kućne kanalizacije je da otpadnu vodu iz sanitarnih uređaja te oborine s krovnih površina najkraćim putem brzo, higijenski i estetski besprijekorno odvede u komunalnu kanalizaciju ili na drugi prikladan način brine. Prosječna temperatura otpadnih voda kreće se u granicama od 11,5° do 20,5°C, a često je povišena u odnosu na vodu u vodovodnom sustavu, zbog upotrebe tople vode u kupaonicama i kuhinjama te uslijed procesa biološke razgradnje.

Kanalizacijski sustav u zgradama ujedno je i sam početak kanalizacije u naselju. Kućna se kanalizacija sastoji od uređajnih i sanitarnih predmeta za zahvaćanje otpadne vode, horizontalne katne mreže, vertikala s ventilacijskim dijelom, glavnoga sabirnog kanala u najnižoj etaži ili u tlu ispod objekta, slivnika i vertikala oborinske kanalizacije, te kućnog priključka na gradsku kanalizaciju. Osim spomenutih dijelova kućna kanalizacija može u određenim uvjetima sadržavati i druge objekte kao što su objekti i uređaji za djelomično ili potpuno pročišćavanje otpadnih voda, objekti i uređaji za dizanje otpadnih voda na višu razinu – kućne crpne stanice, objekti za prikupljanje i obradu otpadnih voda (sabrne jame, septičke jame, mali biološki uređaji), objekti i uređaji za snižavanje razine i odvodnju podzemnih voda (drenažna kanalizacija).

3.1. Odvodnja otpadnih voda

Za odvođenje otpadne vode u kućnoj kanalizacijskoj mreži upotrebljavaju se cijevi raznih materijala i tipova. Izbor cijevi ovisi o vrsti otpadne vode, mjestu upotrebe u objektu i cijeni. Budući da je protjecanje otpadne vode kroz kanalske cijevi, u pravilu, gravitacijsko, te u njima nema većeg pritiska, upotrebljavaju se i materijali koji se inače ne upotrebljavaju za vodovod, kao što su keramika i beton, a cijevi ostalih materijala najčešće imaju tanje stjenke. Na slici 6 prikazan je primjer priključka sanitarnih uređaja na razvod kanalizacijske mreže za odvodnju otpadne vode u objektu.



Slika 6. Kanalizacijska mreža sa sanitarnim uređajima [3]

Cijevi moraju biti otporne na kemikalije, postojane na nagle promjene temperature te otporne na koroziju. Prema namjeni i položaju u kućnoj vodovodnoj mreži primjenjuju se sljedeće vrste cijevi: za temeljne vodove koriste se keramičke cijevi, cijevi od lijevanog željeza, PE visoke gustoće (PEHD – Poly ethylene high density), te PVC-a. Za vertikalne vodove koriste se cijevi od lijevanog željeza, plastične PVC ili PEHD cijevi, a za grane i ogranke najčešće cijevi od lijevanog željeza, čelične te plastične PVC ili PEHD cijevi.

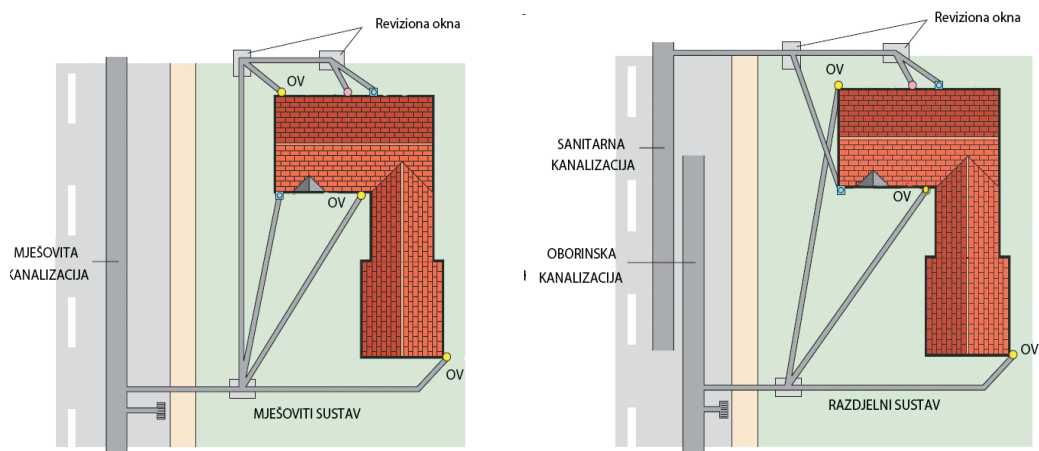
Od svih nabrojanih materijala za izradu cijevi za odvodnju otpadnih voda možda je najznačajnije spomenuti PEHD cijevi koje se proizvode od tvrdog polietilena visoke gustoće, te imaju dugi vijek trajanja. Mogu se koristiti za odvodnju svih

otpadnih voda u objektu, ali i u gradskoj kanalizaciji, u kemijskoj industriji, za radioaktivne otpadne vode te kao eluat na deponijima komunalnog otpada i sl. Ekološki su najprimjerenije od drugih jer je utrošak energije za proizvodnju sirovine i proizvoda sedam je puta manji nego za čelične cijevi, a dva puta manji nego za PVC. Prilikom sagorijevanja ne stvaraju se otrovni plinovi niti se zagađuje okoliš, a mogu se upotrebljavati za otpadne vode temperature od -30°C do $+80^{\circ}\text{C}$ trajno te do 100°C kratkotrajno. Otpornost na habanje veća im je nego metalnih cijevi, a otporne su na udarce i ne mogu se razbiti niti napuknuti [2].

3.1.1. Zbrinjavanje otpadnih voda u naseljima sa izgrađenom javnom kanalizacijom

Bez obzira na mogućnost i uvjete priključka na sustav gradske kanalizacije ili lokalno ispuštanje otpadne vode, kućne se kanalizacije od priključka, odnosno sabirnog voda, projektiraju i izvode uvijek kao razdjelni sustav. U kućnoj se kanalizacijskoj mreži posebnim sustavom prikupljaju otpadne, a posebnim oborinske vode, dok se na gradski sustav priključuju ovisno o njihovoj vrsti.

Ukoliko je gradski sustav mješovitog tipa, kućna će kanalizacija sve otpadne vode prikupljati u glavnoj sabirnoj cijevi, a na gradsku će kanalizaciju biti priključena preko kontrolnog okna. Ako je gradska kanalizacija razdjelnog sustava, kućna kanalizacija će imati po dva kontrolna okna i priključka, odnosno posebni priključak za kućanske otpadne vode i posebni za oborinske vode (slika 7). Često se gradi i tzv. nepotpuna kanalizacija koja nastaje u slučaju kada se kućanska otpadna voda odvodi sustavom kanala u gradsku kanalizaciju ili na lokalno pročišćavanje (septičku jamu, biološki uređaj i sl.), a oborinske se vode slobodno izlijevaju na zemljište oko zgrade ili se upuštaju u tzv. upojne bunare, odnosno u podzemlje [2].



Slika 7. Primjer razdjelnog i mješovitog kanalizacijskog sustava [3]

3.1.2. Zbrinjavanje otpadnih voda u naseljima bez javne kanalizacije

U područjima u kojima još uvijek nije izgrađen kanalizacijski sustav za prikupljanje otpadnih voda, moguća je primjena više rješenja za zbrinjavanje otpadnih voda. Prikupljena otpadna voda, iz stambenih ili drugih objekata, u mjestima gdje nije izgrađen kanalizacijski sustav, ali postoji komunalna služba za pražnjenje, ispušta se u sabirnu jamu kružnog ili pravokutnog oblika. Jama mora biti bez ispusta i preljeva, s jednom komorom i s otvorom minimalne veličine 60*60 cm, te smještena na mjestu do kojeg je moguć pristup vozilima za njeno pražnjenje. U sabirnu se jamu mogu ispuštati otpadne vode iz kućanstva, međutim ne i oborinske vode. Ona ne služi za pročišćavanje otpadne vode, već samo za njenu akumulaciju.

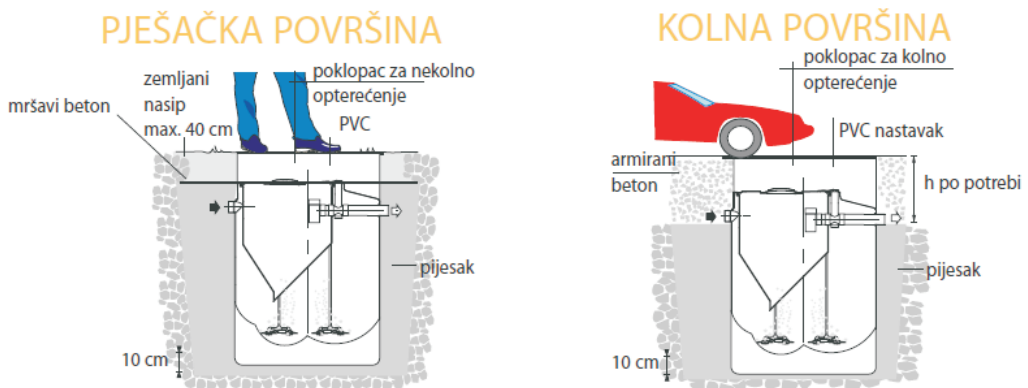
Septička jama je najčešći način prihvata sanitarnih otpadnih voda iz pojedinačnih objekata, uz zadovoljavanje higijenskih uvjeta i služi za prihvati i pročišćavanje otpadnih voda. Vode iz septičke jame se mogu uz potreban oprez i nadzor upuštati u okoliš. U septičkim se jamama taloženjem izdvajaju suspendirane tvari, a istaloženi mulj u njoj i dalje truli. Prema načinu taloženja razlikujemo dvije vrste septičkih jama: jednostavne septičke jame ili septike-trulišta te dvokatne taložnike tzv. emscherske septike ili Imhoffove tankove. Septičke se jame sastoje od dvije ili tri komore pri čemu je prva najvažnija i obično dvostruko veća od drugih. Njena je funkcija izdvajanje taloživih tvari. Druga i treća komora su prelivne, manjeg volumena i često pliće. Izvode se kao ukopani objekti u terenu, u prošlosti kao zidani odnosno betonski objekti dok se danas na tržištu mogu pronaći gotovi elementi proizvedeni od sintetičkih plastičnih materijala (pretežno PE). Takvi gotovi elementi omogućuju bržu ugradnju i lakše uklanjanje ukoliko se u budućnosti izvede javna kanalizacija. Treba napomenuti da ih je potrebno čistiti i prazniti jednom do dva puta godišnje [2, 9].

Kako bi se povećao stupanj pročišćavanja otpadnih voda danas se te vode mogu tretirati na manjim individualnim biološkim uređajima. Na slici 8 i 9 prikazan je primjer biološkog uređaja s aktivnim muljem koji se koristi za pročišćavanje sanitarnih otpadnih voda iz stambenih objekata. Postavlja se između postojeće septičke jame i finalnog recipijenta ili uređaja za predtretman otpadnih voda i prirodnog recipijenta. Uloga mu je pročišćavanje otpadnih voda do odgovarajućeg stupnja nakon čega se voda upušta u prirodni vodotok ili preko upojne građevine u teren. U uređaju se odvijaju procesi oksidacije, aeracije, taloženja i kloriranja. U ulazni dio uređaja kroz polipropilenske cijevi ili PVC cijevi dotječe otpadna voda. Oksidacija otpadnih voda u ulaznoj posudi odvija se dodavanjem zraka iz kompresora, potpuno tihog, smještenog u zasebnom vanjskom kućištu. Time se pospješuje proces pročišćavanja organskih tvari aerobnim mikroorganizmima. Aeracija otpadnih voda vrši se difuzijom zraka u obliku sitnih balončića unutar uređaja preko nezačepljenog difuzora izvedenog od EPDM (ethylene propylene

diene M-class) gume. Taloženje ili sedimentacija krutih tvari iz vodenog toka koji dolazi iz zone oksidacije, vrši se u konusnoj posudi predviđenoj za taloženje. Uređaj je dimenzioniran na način da osigura optimalni period taloženja, u odnosu na predviđenu količinu otpadnih voda. Kloriranje se vrši pri izlazu voda iz uređaja, pomoću tablete aktivnog klora smještene u zasebnom kućištu ispred izlazne cijevi. Ovi uređaji namijenjeni su za sve stambene objekte (s 25 do 65 ekvivalent stanovnika – ES) te se mogu priključiti na postojeću septičku jamu [15].



Slika 8. Biološki uređaj s aktivnim muljem izrađen od polietilena [15]



Slika 9. Načini ugradnje biološkog uređaja s aktivnim muljem ispod pješačke ili kolne površine [15]

3.2. *Odvodnja oborinskih voda*

Donedavno se smatralo da oborinske vode treba što brže prikupiti i odvesti izvan urbanih područja, međutim danas ih se, iz hidroloških razloga, prihranjivanja podzemlja i ponovnog korištenja vode, nastoji zadržati u slivu. Kakvoća oborina nije uvijek besprijekorna jer na svom putu ispiru atmosferu i otapaju ili transportiraju prema površini zemlje sve sastojke koji se ispuštaju u atmosferu na tom području ili koji pod utjecajem vjetra dolaze iz drugih znatno udaljenih krajeva.

Danas se sve više teži tome da odvođenje kišnice iz kuće bude što jednostavnije. Budući da je na zemljištu, na kojem se stambeni objekt gradi, tektonskim procesima, ispiranjem i taloženjem stvorena prirodna ravnoteža između oborina i otjecanja voda, tu ravnotežu valja održati i nakon izgradnje objekta [2].

Za odvodnju oborinskih voda s krovnih površina koriste se pretežno oluci i cijevi od pocinčanog lima (koji se može i bojati) i bakra, te danas i od PVC-a.

3.2.1. *Sustavi za upotrebu kišnice*

Jedan od načina redukcije potrošnje zaliha pitke vode je uvođenje sustava za upotrebu kišnice, kao dopune vodoopskrbnom sustavu. Za snabdijevanje vodom stanovištva koriste se podzemna, izvorska, površinska i atmosferska voda ili kišnica. Atmosferska voda ima svoju primjenu najčešće u vodom siromašnim krajevima, gdje je vodoopskrba stanovništva drugim izvorima pitke vode nemoguća ili preskupa. Danas je, zbog nestašice pitke vode, ali i sve većih prireza na vodu za piće upotreba kišnice opravdana i isplativa. U većini država, obaveza svakog građana je i podmirivanje naknade na padaline, koja se izračunava prema udjelu sazidanih površina na parceli. Površine kuće, vrtne kućice, garaže, te parkovi i dvorišta opterećeni su s do 2 eura po kvadratnom metru. Općine takvu praksu temelje na činjenici da, osim odvoda iz kuće, i padaline koje padaju na sazidane ili posebno uređene površine također odlaze u javnu kanalizaciju [8].

U individualnoj stambenoj izgradnji preporuča se postavljanje spremnika za sakupljanje kišnice. Kišnica se može upotrebljavati za ispiranje WC-a, pranje rublja, čišćenje te zalijevanje vrta. Za ove namjene voda iz gradskog vodovodnog sustava postaje preskupom, a štednja svih resursa iz biosfere, među kojima voda zauzima važno mjesto, osnovno je načelo današnjice. Atmosferska voda ne preporuča se za piće jer dugoročna ispitivanja pokazuju da su spremnici kišnica dobar medij za razvoj raznih mikroorganizama. U domaćinstvu se dnevno potroši i do 130 litara vode po osobi te je zahvaćanjem kišnice moguće uštedjeti i do 60% ukupne godišnje potrošnje vode [2,11].

Za značajnije uštede vode potrebno je osim spremnika ili cisterne izvesti dodatne instalacije za kišnicu unutar objekta te sustav opskrbiti uređajem za

filtriranje i crpkom za dobavu vode (ovisno o smještaju spremnika). Spremnik se može smjestiti unutar objekta, što je najčešće potrebno planirati već u fazi projektiranja ili izvan objekta. Ovakav sustav iziskuje veću početnu investiciju, ali se dugoročno više isplati i iz ekonomskih i iz ekoloških razloga. Danas postoje gotovi spremnici opskrbljeni s uređajima za filtriranje i aeraciju prikupljene vode. Preljev iz spremnika može se spojiti na postojeći kanalizacijski sustav ili u upojni bunar [2].

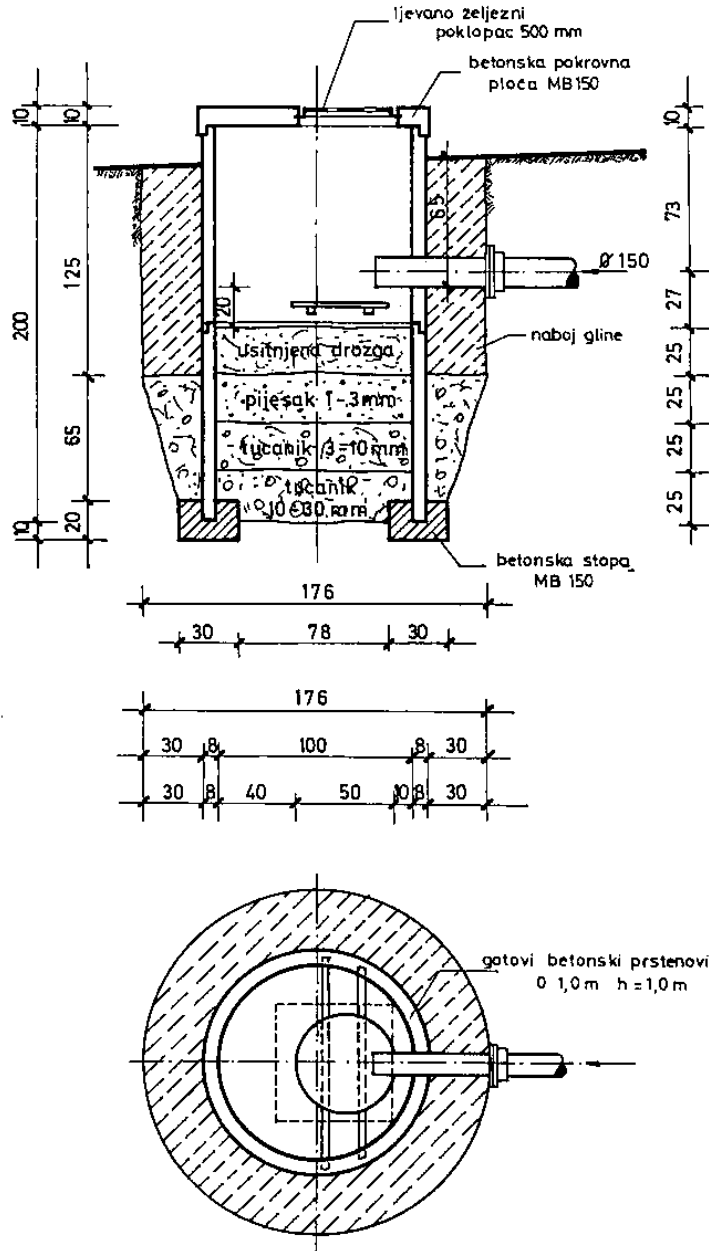
U sušnim predjelima nekih zemalja oborinska voda se osim u pojedinim kućanstvima sve više koristi i kod većih potrošača kao što su škole i veće stambene zgrade i to prvenstveno za ispiranje WC-školjki. Osim u kućanstvu u svijetu se sve više oborinska voda koristi i u poljoprivredu za navodnjavanje. Svaka ozbiljnija poljoprivredna proizvodnja danas je nezamisliva bez sustava za navodnjavanje, kako se u te svrhe ne bi trošile velike količine pitke vode [2,8].

Spremnici za sakupljanje kišnice prikazani na slici 10 su posude u koje se sa krovova kuća ulijeva kišnica koja dalje ulazi u cijevni sustav za korištenje [12].



Slika 10. Spremnici za kišnicu sa električnom pumpom [11, 28]

Objekti za zahvat većih količina oborinske vode sastoje se od sabirne površine, spremnika-cisterne, filtera i bunara. Kao sabirne površine najčešće se koriste krovovi kuća te čiste i popločene površine u blizini zgrade. Zbog što bolje kvalitete vode u cisterni, sabirne površine moraju biti što manje izložene zagađenju. Spremnici odnosno cisterne, koji ponekad služe i kao taložnice, moraju biti izrađeni se od nepropusnog materijala, dok filtri za pročišćavanje kišnice moraju biti od sitnog i čistog pijeska, koji je povremeno potrebno zamijeniti [1].

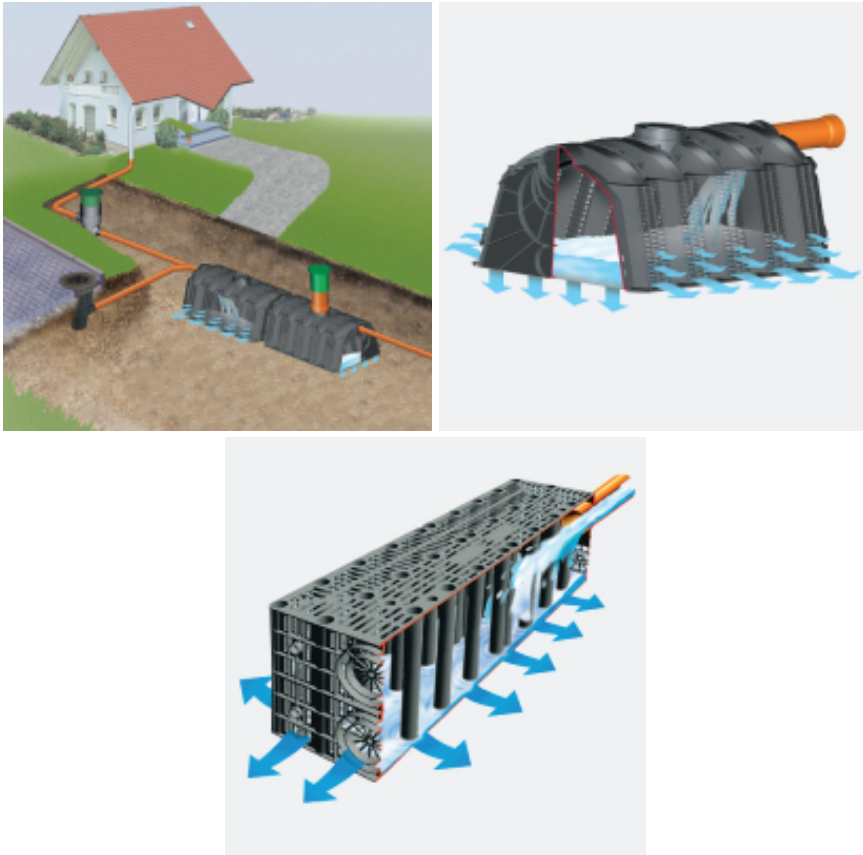


Slika 11. Princip izvedbe upojnog bunara [2]

3.3. Upojne građevine

U našim se područjima za lokalno odvođenje oborinskih voda često primjenjuju tzv. upojni bunari prikazani na slici 11. Ispuštanjem viška prikupljene vode s krova

u upojni bunar, postiže se učinak nepotpunog ili razdjelnog sustava kanalizacije uz istovremeno prihranjivanje podzemnih voda koje je u naseljenim mjestima smanjeno izgradnjom objekata, odnosno povećanjem vodonepropusnih površina [1,2]. Danas na tržištu postoje već gotovi upojni blokovi i tuneli pretežno od PE kojima se uvelike ubrzava izvođenje upojnih građevina te smanjuje cjelokupni trošak njihove izgradnje (slika 12).



Slika 12. Upojni tuneli i blokovi [28]

4. Novi materijali i tehnologije u opremanju sanitarnih prostorija

Sanitarni se predmeti smatraju samim početkom kanalizacijske mreže jer predstavljaju čvrstu vezu između dviju međuovisnih instalacija: vodovoda i kanalizacije. Svaki je sanitarni predmet spojen na vodovodno izljevno mjesto te odvod za u njemu tek prikupljene otpadne vode. To su otvorene posude čija je glavna funkcija prijam, upotreba i odvod vode, a nazivamo ih i prijamnicima

otpadne vode. Razlikuju se prema namjeni, konstrukciji i vrsti otpadne vode koju prikupljaju.

Prilikom odabira dimenzija sanitarnog predmeta te smještajnog prostora potrebno je obratiti pažnju na odnos sanitarnog predmeta i fizioloških potreba čovjeka u različitim životnim dobima. Sanitarne posude moraju biti vodonepropusne, glatkih površina, zaobljenih rubova, izrađene od materijala primjerene čvrstoće i trajnosti, funkcionalne, estetski prihvatljive i jednostavne konstrukcije, lako ugradive te dugovječne.

Za proizvodnju sanitarnih predmeta u prošlosti su se upotrebljavali razni materijali kao što su keramika, lijevano željezo, razni metalni limovi te kamen, a danas pretežno keramika te noviji sintetički materijali. Na slici 13 prikazan je primjer kupaonice modernog dizajna s tuš površinom „floor“ od čelika ili emajla koja je ista kao i podna površina.



Slika 13. Kupaonica s tuš površinom „floor“ od čelika ili emajla [10]

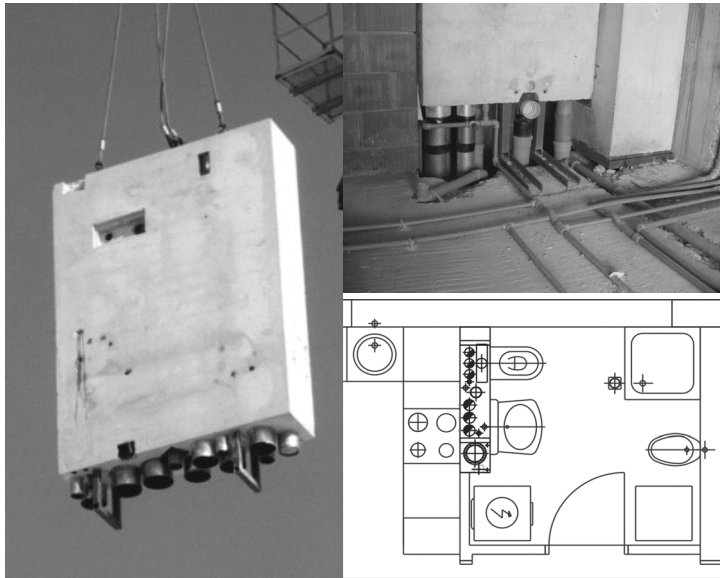
Danas je za većinu sanitarnih predmeta kao što su umivaonici, wc-školjke, bidei, pisoari i slično, keramika najprihvatljiviji i najčešće primjenjivani materijal. Keramički materijali su sanitarni porculan, fajansa ili kamenina i šamotna keramika. Za izradu sanitarnih predmeta i opreme kao što su vodokotlići, sifoni, zahodske školjke i slično, danas se sve više upotrebljavaju sintetički materijali za koje je karakteristično da ne korodiraju, služe kao dobri toplinski i zvučni izolator, male su mase te relativno povoljni cijenom.

Pri projektiranju i sanaciji kupaonica, danas, se sve više koriste predzidne instalacije. One omogućavaju lakša, brža i estetski prihvatljiva rješenja vodovodnih i kanalizacionih instalacija u sanitarnim prostorijama. Kao primjer prikazuju se Kombifix i Duofix montažni elementi koji se sastoje od skrivenog plastičnog rezervoara u metalnom okviru. Komplet sadrži sve spojne elemente za instalaciju i elemente za učvršćenje, što omogućuje jednostavnu i brzu montažu [2]. Na slici 14 prikazan je primjer kupaonice u kojoj su instalacije dovoda i odvoda riješene unutar postavljene okvirne konstrukcije s montažnim elementima.



Slika 14. Od okvirne konstrukcije s montažnim elementima i cijevima dovoda i odvoda do gotove kupaonice [16]

Danas su sve više u primjeni instalacijski blokovi kao npr. SIGMA blokovi prikazani na slici 15, odnosno gotovi montažni zidovi sa već ugrađenom svom potrebnom instalacijom dovoda pitke i odvoda otpadne vode za potrebe kuhinje i kupaonice. Prednost takvih blokova je u tome što se pri proizvodnji mogu prilagoditi građevinskim i arhitektonskim zahtjevima izgradnje svakog pojedinog objekta. Mogu biti izvedeni kao pregradne stijene između kupaonice i kuhinje te kao blokovi s instalacijama montirani na već postojeći zid svih dimenzija. Osim instalacija vodovoda i kanalizacije mogu sadržavati i instalacije ventilacije te dimovodne kanale [26].



Slika 15. SIGMA blokovi [26]

U svijetu je sve popularnija ugradnja gotovih montažnih kupaonica prema projektu i želji investitora, sa unaprijed zadanim dimenzijama, opremom i završnim radovima (slika 16). Ovakva „spremna za upotrebu kupatila“ opremljena su svim traženim elementima te se mogu ugraditi direktno na pripremljene betonske ploče te spojiti na vodovodnu i kanalizacijsku kućnu instalaciju kao i na električne i ventilacijske sustave.



Slika 16. Primjer gotovog montažnog kupatila izvedenog u Italiji – Hotel cruise, Como Italia, te kombinacija kupatila i kuhinje spremnih na ugradnju [27]

5. Primjer primjene novih tehnologija i materijala u kućnim hidroinstalacijama

U primjeru prikazanom na slikama 17 i 18 dano je rješenje vodoopskrbe i odvodnje jedne obiteljske kuće P+1 korištenjem modernih materijala, tehnologija i pristupa izvođenju kućnih instalacija [4].

Za izvođenje instalacije dovoda pitke i odvoda otpadne vode korištene su PVC cijevi.

Dovod pitke vode riješen je priključkom na javni vodovod. Osiguranje tople vode riješeno je kombinacijom električne i solarne energije, postavljanjem više bojlera kapaciteta 160 litara.

Zbrinjavanje otpadnih i oborinskih voda rješava se unutar same parcele jer ne postoji mogućnost priključka na javni kanalizacijski sustav.

Osim modernih materijala za dovod i odvod vode te solarne energije za osiguravanje tople vode, primijenjen je pristup zadržavanja kišnice na terenu njenim skladištenjem u podzemni spremnik volumena 6500 litara. Oborinska voda ulazi u spremnik preko filtera koji služi za odstranjivanje krupnog otpada iz vode te se prema potrebi dodatno obrađuje. Tu kišnicu moguće je koristiti za zalijevanje zelenih površina oko objekta te kao dopunu punjenju bazena pri čemu treba obratiti pažnju na kakvoću vode i primijeniti dodatnu dezinfekciju oborinskih voda ultraljubičastim (UV) zračenjem. Višak vode iz spremnika se preljevom odvodi zajedno s pročišćenom otpadnom vodom u gotove PE upojne tunele.

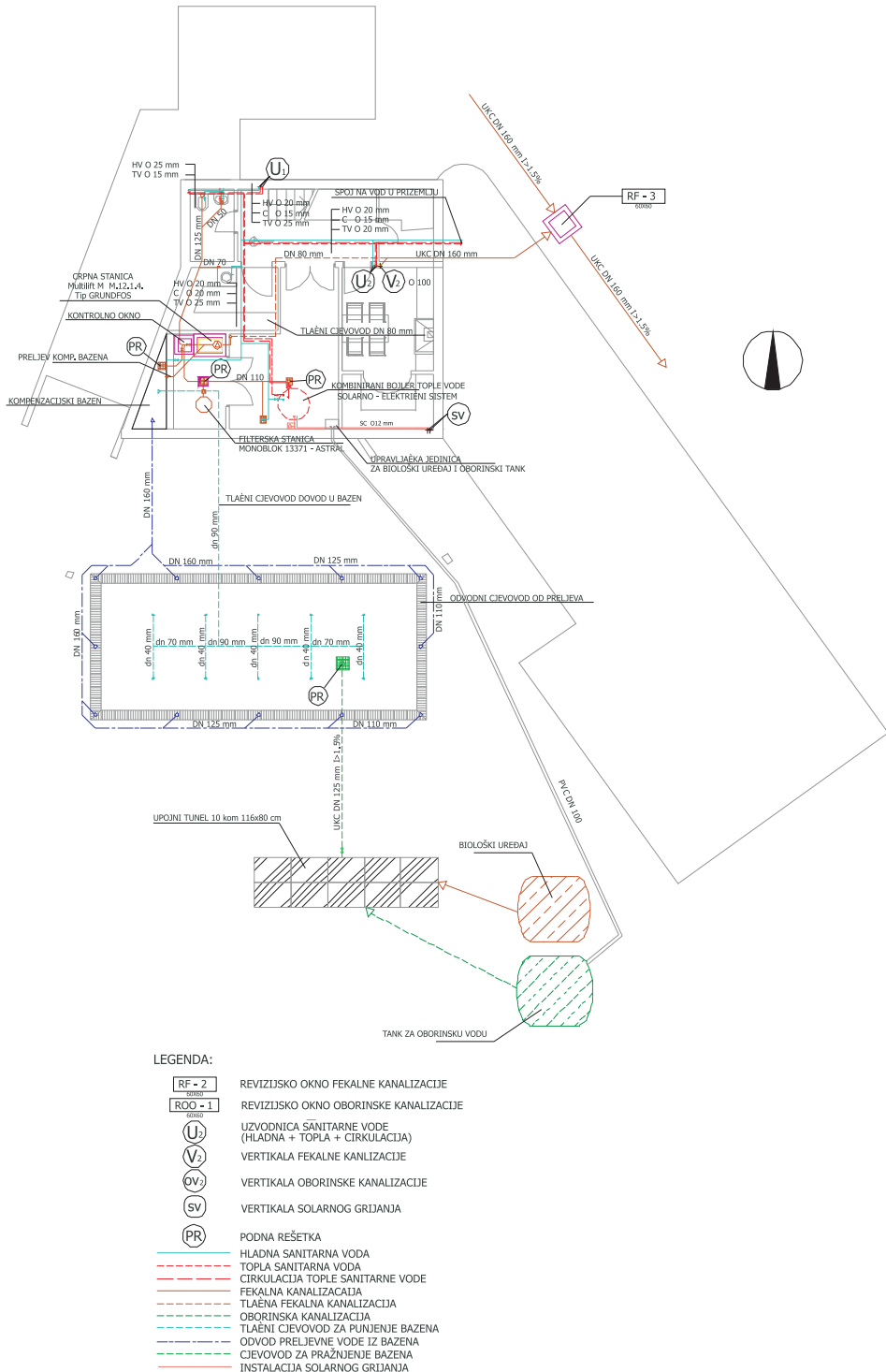
Za pročišćavanje otpadnih voda korišten je mali biološki uređaj sličan uređaju opisanom u točki 3.1.2 koji predstavlja moderno rješenje u području tehnologije obrade otpadnih voda. Voda se nakon pročišćavanja preko upojnih PE tunela upušta u teren čime se omogućuje zbrinjavanje vode, ali i prihranjivanje podzemnih voda [4].

Pražnjenje bazena je također ostvareno korištenjem PE upojnih blokova.

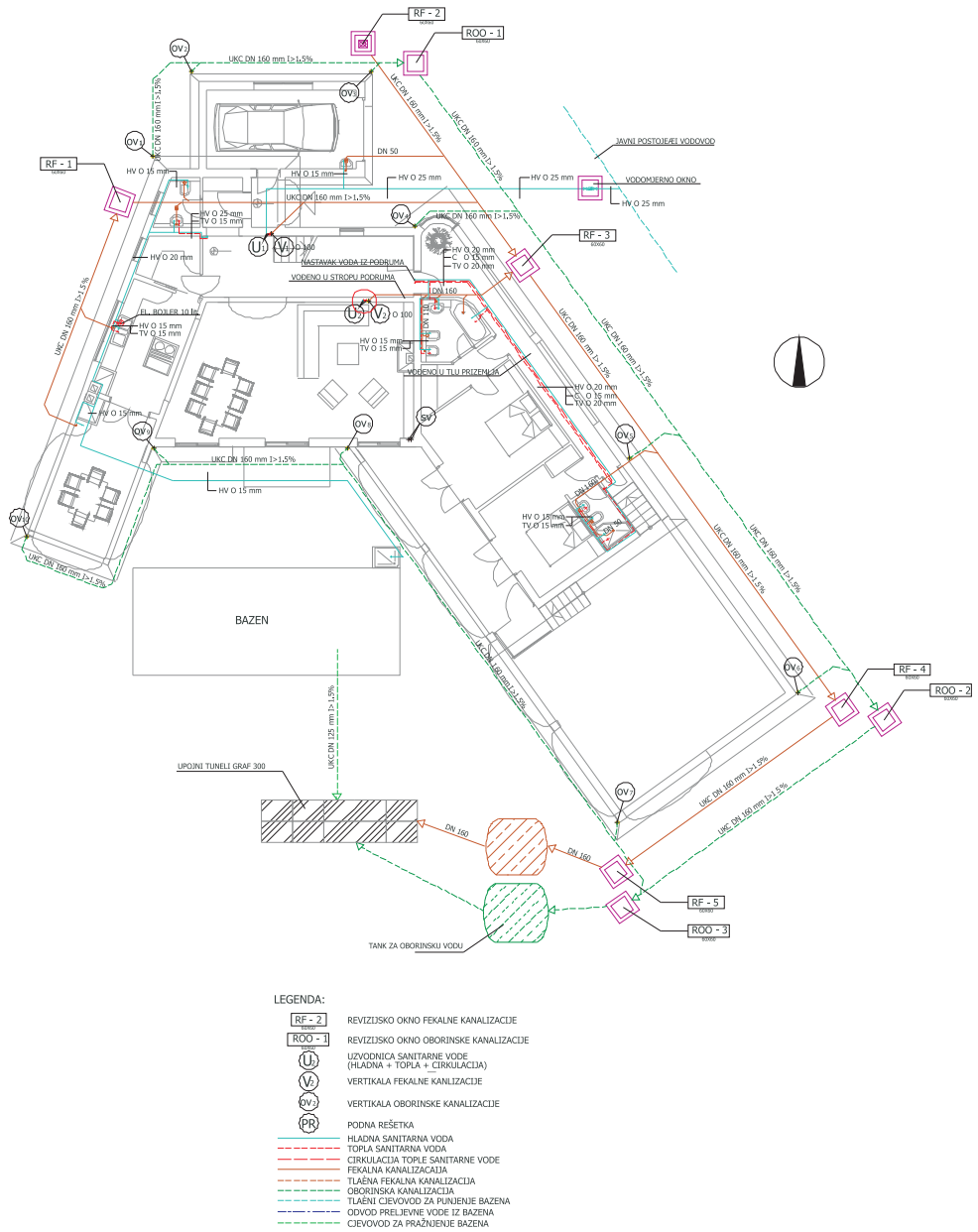
Prezentirano rješenje predstavlja moderan pristup rješavanju hidroinstalacija u stambenim objektima pri čemu se nastoji pronaći ekonomski dugoročno isplativa rješenja koja su ujedno i ekološki prihvatljivija te u skladu s principima održivog razvoja.

6. Zaključak

U ovom radu prezentirani su neki od najznačajnijih novih materijala, tehnologija i pristupa u izvođenju i korištenju kućnih hidroinstalacija kojima je moguće unaprijediti standard življenja u stambenim, ali i u drugim objektima.



Slika 17. Tlocrt podruma obiteljske kuće P+1 – hidroinstalacije



Slika 18. Tlocrt prizemlja obiteljske kuće P+1 – hidroinstalacije

Primjena novih materijala za dovod i razvod hladne i tople vode, kao i odvodnju otpadnih i oborinskih voda omogućuje brže i lakše polaganje instalacija te garantira veću vodonepropusnost. Korištenje vodomjera novije generacije omogućuje točniju kontrolu nad potrošnjom vode i gubicima iz vodovoda i kućne instalacije, koja je ujedno zbog mogućnosti daljinskog očitavanja brža i jeftinija, kao i očitavanja vodomjera koji se nalaze na nedostupnim mjestima i u zatvorenim prostorijama. Korištenje solarne energije kao alternativnog izvora energije za osiguranje tople vode u objektima omogućuje štednju električne energije u domaćinstvima, čime se doprinosi kućnom budžetu, ali i ukupnom smanjenju potrošnje električne energije u urbanim sredinama. Korištenje modernijih oblika i materijala za izradu sanitarnih uređaja u svakom slučaju doprinosi funkcionalnijem korištenju istih te pretvara kupaonski prostor u dio stambenog prostora u kojem se zadržavamo duže i koji osim svojih osnovnih funkcija (korištenje wc-a i održavanje osobne higijene) postaje prostor za odmor i opuštanje. Nove metode ugradnje instalacija i priključaka u obliku predzidnih instalacija i blokova omogućuju lakšu i bržu ugradnju.

Zbrinjavanje otpadne vode za objekte koji nemaju priključak na kanalizaciju danas je uvelike olakšano korištenjem već gotovih tipskih manjih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda od sintetičkih plastičnih materijala, koji se vrlo brzo i jednostavno mogu ugraditi uz septičku taložnicu ili samostalno te pročišćavati otpadnu vodu traženim stupnjem pročišćavanja (ovisno o izabranom tipu uređaja). Nakon pročišćavanja voda se prema potrebi može dezinficirati i u puštati u teren korištenjem već gotovih upojnih građevina također od plastičnih materijala. Navedene upojne građevine se mogu koristiti i za zbrinjavanje oborinskih voda, pod uvjetom da se vode s parkirališnih površina trebaju prethodno tretirati. Upuštanjem voda u teren obogaćuju se podzemne vode. Zadržavanje i korištenje oborinske vode s krovnih površina, kao sekundarnog izvora vode, moguće je za zalijevanje vrtova ispiranje wc-a i sl. Takvim se pristupom postiže dvostruka korist, smanjuje se potrošnja pitke vode, ali i količina vode koja dospijeva u javni kanalizacijski sustav što rezultira manjim dimenzijama kanalizacijskih cijevi i manjim problemima u radu uređaja za pročišćavanje kod mješovitog sustava odvodnje.

Zaključno možemo reći da su nove tehnologije, materijali i pristupi u izvođenju i održavanju hidroyinstalacija svakako doprinijeli kvaliteti stanovanja, ali i omogućili bržu i jeftiniju ugradnju tih instalacija; bržu, jeftiniju i točniju kontrolu potrošnje vode; racionalnije korištenje vodnih resursa i bolju zaštitu okoliša općenito pa tako i vodnih resursa od zagađenja.

Literatura

- [1] M. Radonić. *Vodovod i kanalizacija*. Croatia knjiga Zagreb, 2003.
- [2] B. Tušar. *Kućna kanalizacija*. Mtg-topograf d.o.o.Velika Gorica, Zagreb, 2001.
- [3] S. Muscroft. *Plumbing*. Elsevier, Burlington, 2007.
- [4] Z. Cuculić. *Idejni projekt vodoopskrbe i odvodnje niske slobodnostojeće stambene građevine*. Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2008.
- [5] D. Sergo. *Idejni projekt vodoopskrbe i odvodnje stambeno-poslovne građevine*. Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2008.
- [6] *Pravilnik o mjeriteljskim zahtjevima za vodomjere za hladnu vodu*, NN 11/94.
- [7] B. Motik. *Zelena energija*, Zelena mreža aktivističkih grupa, 3-32, Zagreb, 2005.
- [8] B. Tušar, I. Dodigović, A. Đunđek. *Ekološki način prikupljanja I odvodnje otpadnih I oborinskih voda*. U: Dario Ban, *Razdjelni sustavi odvodnje*, 31-38., Hrvatske vode, Čakovec, 2006.
- [9] B. Karleuša, Ž. Elvis, S. Prpić. *Stanje i mogućnosti zbrinjavanja otpadnih voda malih naselja u Hrvatskoj*. U: Željko Arbanas, Gojko Balabanić, Čedomir Benac ect., *Zbornik radova*, 55-81., Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci, 2009.
- [10] <http://www.gradimo.hr/>
- [11] <http://www.baumax.hr/>
- [12] <http://r-ekoprodukt.hr>
- [13] <http://www.termocommerce.hr>
- [14] www.gorenjetiki.si
- [15] www.isea.hr
- [16] <http://www.geberit.hr>
- [17] www.brunata.hr
- [18] www.sewerhistory.org
- [19] <http://inventors.abaut.com>
- [20] www.invent.org/hall_of_fame
- [21] www.americanchemistry.com
- [22] www.oxfordplasticsinc.com
- [23] www.indiamart.com
- [24] <http://www.plasticpipe.com.cn>
- [25] www.heat-systems.co.uk
- [26] <http://www.sigmanova.si/>
- [27] <http://poslovneideje.rs>
- [28] www.otpadnevode-kisnica.com.hr
- [29] www.cmc-ekocon.hr

Nekonzervativni pristup projektiranju gatova na izloženoj lokaciji

Non-conservative approach to design of jetties in exposed locations

Nino Krvavica*, Nenad Ravlić**

Sažetak. Proces oblikovanja pomorskih građevina podrazumijeva detaljne analize valne i morske hidrodinamike, posebno ukoliko se namjeravani zahvat kani izvesti na potpuno izloženoj lokaciji, bez prave prirodne zaštite od valovanja.

U tim slučajevima, pored uobičajenih analitičkih obrada vjetrovalne klime i statističke obrade dugoročnih vjerojatnosti pojavljivanja mjerodavnih valova, vrlo koristan inženjerski alat predstavlja hidrodinamički model valovanja, s pomoću kojeg se mogu preciznije odrediti valne karakteristike na neposrednoj lokaciji građevine, što može imati značajnog utjecaja na izbor njezinog konstruktivnog rješenja.

U ovom radu prezentira se postupak oblikovanja i optimizacije dimenzija jednog armiranobetonskog rasčlanjenog gata u luci Volosko, prilikom čega su korišteni rezultati matematičkog modeliranja visina valova kao osnovnog ulaznog parametra za proračun kvazistatičkih opterećenja na podgled i bokove konstrukcije, u skladu s izrazima dobivenim na osnovi recentnih eksperimentalnih istraživanja.

Ovakav metodološki pristup oblikovanju konstrukcije rezultirao je u odabiru takvih geometrijskih karakteristika građevine (prvenstveno izdignutosti konstrukcije od morske razine i visine elementa rasponske konstrukcije) koje garantiraju prihvatljivu kombinaciju sigurnosti na prevrtanje (uslijed hidrodinamičkih opterećenja) i pritisaka na temeljno tlo s ograničenom nosivosti.

Projektno rješenje koje se predstavlja u ovom radu realizirano je i danas se uspješno koristi za predviđenu namjenu javnog plivališta. Premda neuobičajeno elegantnih dimenzija za potpuno izloženu lokaciju u Riječkom zaljevu, gat je uspješno i bez ikakvih oštećenja prošao sve dosadašnje testove, uključivo i ekstremna hidrodinamička opterećenja iz zime 2009. godine, registrirana upravo u NW dijelu Riječkog zaljeva gdje se gat nalazi. Na taj način je i u praksi dokazano

* Institut IGH, Slavka Tomašića 5, Rijeka, nino.krvavica@igh.hr

** Institut IGH, Slavka Tomašića 5, Rijeka, nenad.ravlic@igh.hr

da se tradicionalna masivna odnosno monolitna rješenja za gradnju na izloženim morskim lokacijama mogu značajno optimizirati ukoliko se u ranim fazama osmišljavanja rješenja primijene alati koji bolje aproksimiraju realna stanja opterećenja kojima će biti izvrgnuta određena pomorska građevina.

Ključne riječi: raščlanjeni armiranobetonski gat, izložena lokacija, optimizacija konstrukcije, modeliranje valovanja

Abstract. The process of shaping engineering structures in coastal areas inevitably involves detailed wave and sea currents analysis, especially if a structure is located in exposed location, without effective natural or artificial protection against wave action. In such cases, the application of hydrodynamic wave models can be very useful as a complementary engineering tool that can support both standard wind/wave forecasts and statistical analysis and to help in selecting optimum structural solution for given structure.

This paper presents the process and methodology of selecting the optimum shape for one reinforced-concrete jetty in Volosko port, whereby the results of wave heights modelling were used as the main input parameter for calculating quasi-static loads on the structure's bridge deck soffit and sides, in accordance with expressions resulted from recent experimental measurements.

The above methodological approach to shaping and sizing of the structure in concern has resulted in such structural features (primarily the elevation of the structure's bridge deck soffit above the sea level and side height of main beams) that are selected to provide optimum combination between resistance against overturning and supporting soil resistance in limited carrying capacity conditions.

The solution which is presented in this paper was executed and is still serving its primary purpose (public swimming area). Although unusually elegant for given exposed location in the Rijeka Bay, the jetty has successfully resisted to all natural tests it has been subject to so far, including the extreme environmental load conditions in January 2009, recorded exactly in the NW part of the Bay where the jetty is located. In such a way it has been proven again that traditional and conservative solutions for coastal structures in exposed locations can significantly be optimized, providing adequate tools and methods (able to better approximate real wave conditions and resulting loads) have been applied in the early stages of design process.

Key words: reinforce-concrete jetty, exposed location, structural optimization, wave modeling

1. Uvod

Rasponske konstrukcije raščlanjenih armiranobetonskih obalnih građevina na izloženim morskim lokacijama izložene su istovremenom djelovanju valova u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini. Dok za opterećenja u horizontalnom smjeru postoje brojni proračuni i njihove modifikacije [1], precizniji proračuni opterećenja u vertikalnom smjeru često se zanemaruju, a u inženjerskoj praksi se uglavnom "rješavaju" konzervativnim pristupom kroz povećanje mase konstrukcije.

Negativna strana konzervativnog pristupa očituje se u nepotrebnom predimenzioniranju konstrukcije (povećanje mase rasponske konstrukcije i visine presjeka glavnog nosača), što neminovno vodi većim horizontalnim hidrodinamičkim opterećenjima, većim destabilizacijskim momentima kod slobodnih (tj. bočno nepoduprtih) konstrukcija i posljedično, potrebi dodatnog povećanja mase temelja radi osiguravanja stabilnosti građevine.

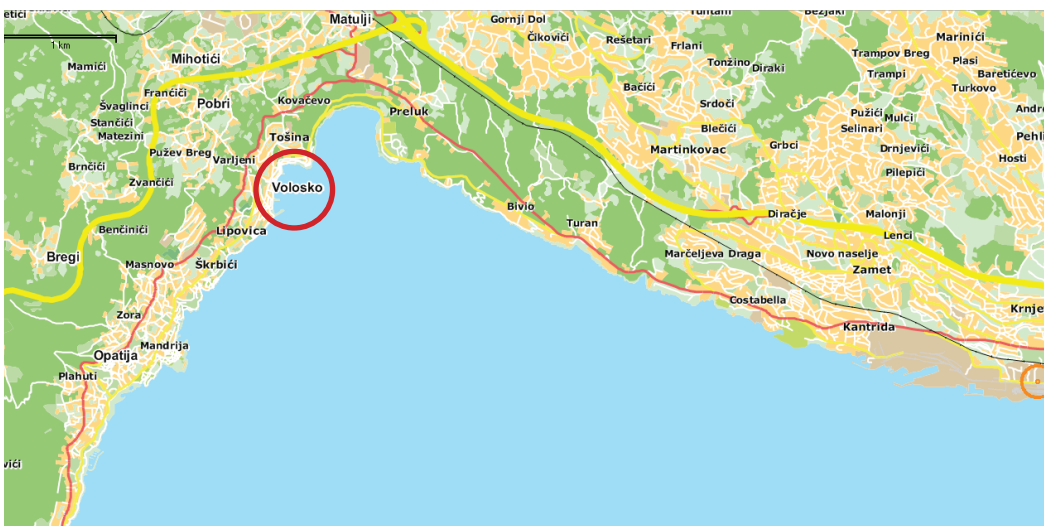
U nekim slučajevima je izgradnja masivnijih konstrukcija ne samo ekonomski neučinkovita, nepotrebna sa stajališta nosivosti i stabilnosti konstrukcije, nego dovodi i do problema u smislu temeljenja, naročito u slabije nosivim tlima.

Jedina prava alternativa konzervativnom pristupu projektiranju raščlanjenih obalnih konstrukcija može počivati na preciznijem proračunu (odnosno modeliranju) horizontalnih i vertikalnih pritisaka, na osnovi kojih se odabiru optimalne dimenzije i geometrijske karakteristike konstrukcije koja treba zadovoljiti sve uvjete stabilnosti, mehaničke otpornosti i uporabivosti.

U nastavku će se na primjeru jednog raščlanjenog armiranobetonskog gata u luci Volosko prikazati mogućnosti alternativnog pristupa koji u suštini počiva na modeliranju valovanja s ciljem preciznijeg proračunavanja ukupnih hidrodinamičkih opterećenja na izloženu konstrukciju gata.

2. Lokacija zahvata

Luka Volosko nalazi se u krajnjem sjeverozapadnom dijelu Riječkog zaljeva, približno 1 km udaljena od Opatije u smjeru uvale Preluk (slika 1).



Slika 1. Šire područje luke Volosko u NW dijelu Riječkog zaljeva

3. Vjetrovalna klima

3.1. Vjetar na lokaciji planiranog zahvata

U maritimnom smislu, lokacija luke Volosko je dobro zaštićena od sjevernih i zapadnih vjetrova, dok najznačajniji utjecaj imaju vjetrovi iz jugoistočnih i sjeveroistočnih smjerova. S obzirom na jakost, učestalost i duljinu privjetrišta dominantan vjetar je jugo, koji puše iz SE i SSE smjerova, pretežito u zimskim mjesecima kada može imati čak i olujni karakter te stvarati vrlo visoke valove. Bura, koja puše iz NE smjera, također može biti velike jakosti, ali zbog vrlo kratkog privjetrišta ne stvara valove značajnijih visina na području Voloskog.

3.2. Vjetrovni valovi

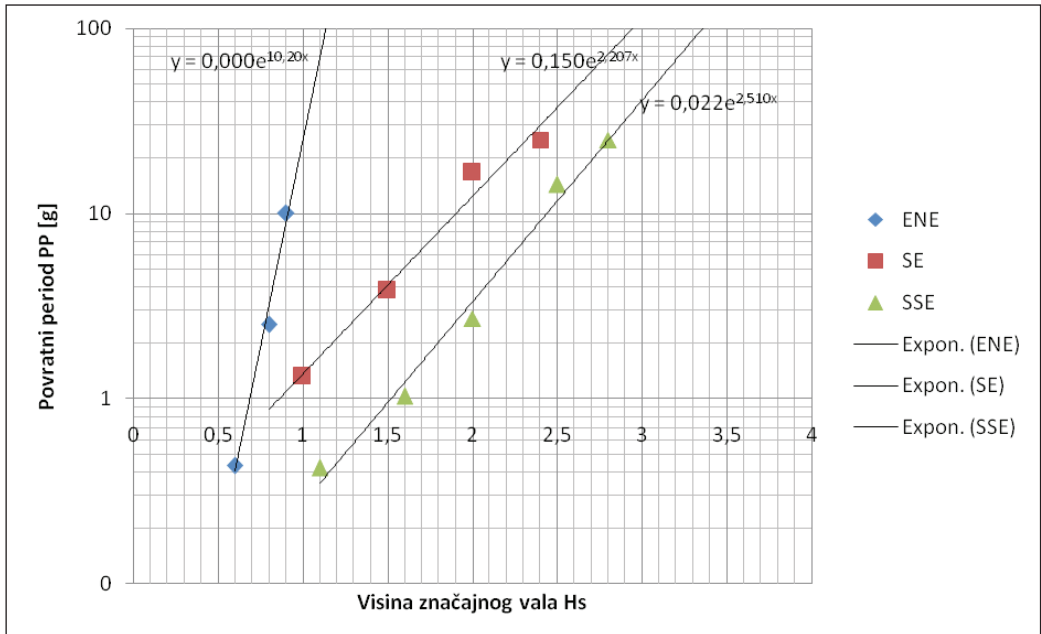
Za prognozu karakteristika dubokovodnih valova vrlo često se kod poluzatvorenih i razvedenih akvatorija koristi Gröen-Dorrensteinova metoda [2]. U predmetnom slučaju, proračun je izvršen za dva mjerodavna sektora: sektor I (SE i SSE) i sektor II (ENE). Proračunski podaci prikazani su u Tablici 1.

Tabela 1. Značajne visine dubokovodnih valova ispred luke Volosko

		Značajna visina vala (m)				
Sektor	Privjetrište (km)	Jačina vjetra (Bf)				
		5	6	7	8	9
I	2	0,4	0,6	0,8	0,9	-
II	22	1,1	1,6	2	2,5	2,8

3.3. Valne prognoze

Na osnovu dobivenih značajnih valnih visina i kontingencijske tablice puhanja vjetrova iz raznih smjerova u Riječkom zaljevu izrađena je dugoročna prognoza pojavljivanja određenih valnih visina na lokaciji luke Volosko (slika 2).



Slika 2. Dugoročna prognoza značajnih valnih visina na lokaciji luke Volosko (povratni period 1 – 100 g).

3.4. Razine mora

Pored poznavanja osnovnih valnih karakteristika (posebno visine vala), jednako važan segment predstavlja poznavanje statističkih podataka o oscilacijama morskih razina na predmetnoj lokaciji. S obzirom da se na lokaciji luke Volosko ne vrše mjerenja morskih razi, interpolacijom podataka za mareografske stanice Rovinj i Bakar dobivene su slijedeće mjerodavne vrijednosti, izražene u apsolutnim geodetskim kotama:

Extr VR 100	+1,38 m
Extr VR 10	+1,23 m
SVVRŽ	+0,50 m
SR	+0,10 m
SNNŽR	-0,23 m
Extr NR 10	-0,62 m
Extr NR 100	-0,74 m

4. Hidrodinamičko modeliranje valovanja

4.1. *Općenito o modelu valovanja*

Za precizan opis valovanja u širem i užem području lokacije namjeravanog zahvata u luci Volosko koristio se numerički model SMS (Surface-Water Modeling System [3]), odnosno njegov modul CGWAVE [4] koji rješava jednadžbu valova “blagog nagiba” (tzv. “mild-slope equation” ili MSE, vidi izraz (1)), uzimajući istovremeno u obzir kombinirane utjecaje refrakcije, difrakcije i trenja s morskim dnom, lom vala te nelinearnu disperziju vala za vrijeme transformacije iz dubokovodnog u prijelazno, odnosno plitko područje [4]:

$$\nabla(CC_g \nabla \hat{\eta}) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \hat{\eta} = 0 \quad (1)$$

gdje je σ frekvencija vala, $\hat{\eta}(x,y)$ promjena morske površine kod valovanja, $C(x,y)$ fazna brzina, $C_g(x,y)$ grupna brzina. Osnovna MSE jednadžba spada u klasu eliptičnih parcijalnih diferencijalnih jednadžbi, u kojima se pretpostavlja malen stupanj promjene modeliranih veličina u vremenu prolaska jedne valne dužine kroz kontrolni presjek [5]. Vjerno opisuje profil vala do nagiba 1:3, a zadovoljavajuće je primjenjiva i za nešto strmije valove Jadranskog mora [6].

U numeričkom smislu, MSE jednadžba se uglavnom rješava iterativno (implicitna metoda), čime se značajno umanjuju zahtjevi za memorijskim prostorom i računalnim resursima te povećava mogućnost veće detaljnosti analize s više računskih točaka.

4.2. *Postupak modeliranja*

Postupak modeliranja valovanja započinje unosom geometrije obale i morskog dna (batimetrija) u prostornu domenu modela, u kojoj se daljnja prostorna diskretizacija obavlja automatskim generiranjem mreže konačnih elemenata u definiranom koordinatnom sustavu s realnim grafičkim okruženjem (npr. orto-foto podloga, topografska karta).

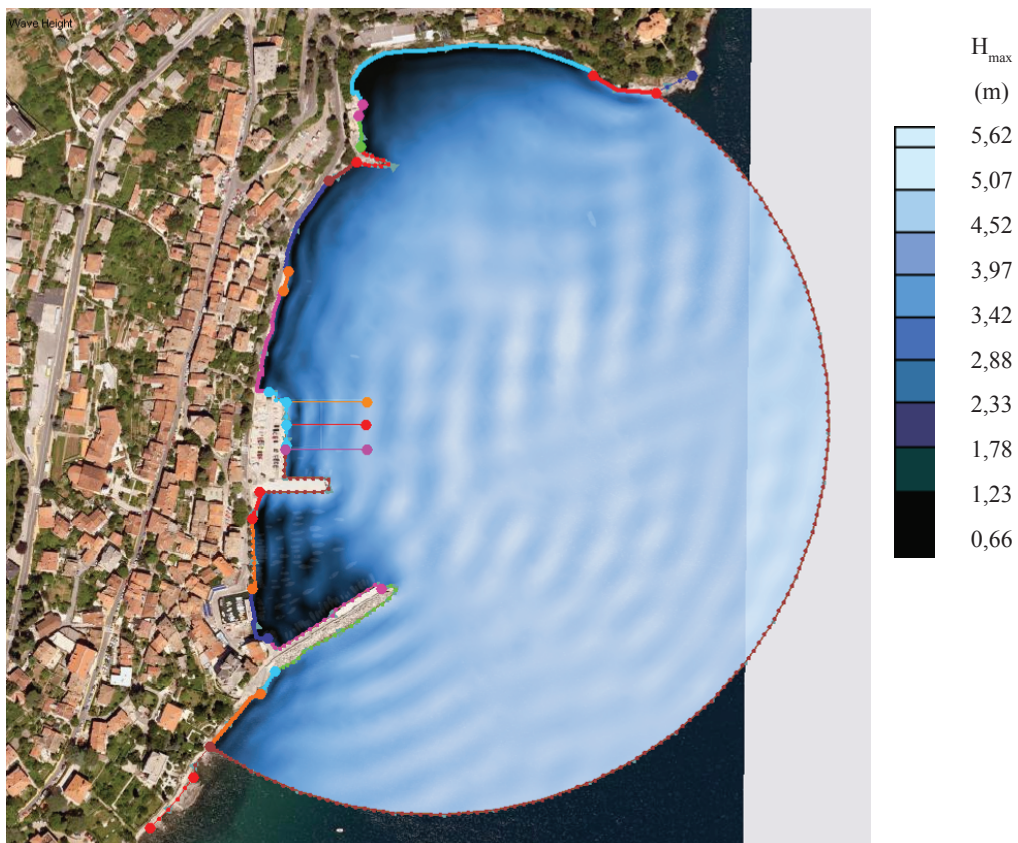
Pri generiranju mreže konačnih elemenata potrebno je definirati karakterističnu prostornu dimenziju (tzv. “rezoluciju”) mrežnih elemenata, koeficijente refleksije i transmisije te početne uvjete. Slijedi definiranje podataka o odgovarajućim valnim parametrima (smjer, period i amplituda vala) koji će se koristiti za agitaciju morske površine u prostornoj domeni modela. Projektni parametri koji su korišteni u predmetnom slučaju sistematizirani su u Tablici 2.

Tabela 2. Valni parametri korišteni za agitaciju akvatorija ispred luke Volosko

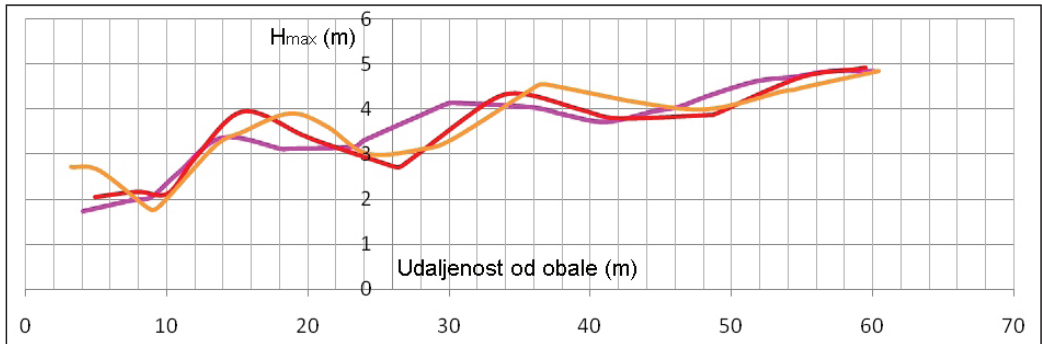
	Sektor I	Sektor II
Smjer:	202°	135°
Period:	3,8 s	6 s
Amplituda	1,1 m	2,6 m

Prikaz i grafičku obradu rezultata modeliranja vrši post-procesor koji ima mogućnost prikaza u skalarnom (visina vala, dubina mora, pritisak vala na tri dubine) i/ili vektorskom obliku (smjer i brzina propagacije vala).

Primjer prikaza prostorne distribucije jedne skalarne veličine (visina vala) prikazan je na slici 3, dok je na slici 4 dan prikaz anvelope maksimalnih visina vala za tri odabrana linijska presjeka kroz dio prostorne domene modela u kojem se nalazi planirani gat.



Slika 3. Prostorni prikaz modeliranih valnih visina u području luke Volosko u uvjetima agitacije akvatorija valovanjem iz sektora II (SSE)



Slika 4. Anvelopa maksimalnih modeliranih visina valova na tri kontrolna presjeka na lokaciji gata u uvjetima agitacije valovanjem iz sektora II (SSE)

4.3. Odabir mjerodavnih valnih parametara

Rezultati prikazani na slici 4 evidentno ukazuju na kumulativne disipativne efekte koji se javljaju tijekom gibanja valova prema obali, prilikom čega se visina dubokovodnog vala smanjuje ne samo zbog među-djelovanja s preprekama (lukobran, morsko dno), nego i uslijed interakcije primarnih i reflektiranih valova.

Imajući u vidu poziciju gata u luci Volosko, za analizu opterećenja konstrukcije uslijed valovanja odabrani su slijedeći mjerodavni valni parametri (sektor II):

$$H_{\max} = 4,0 \text{ m (maksimalna visina vala)}$$

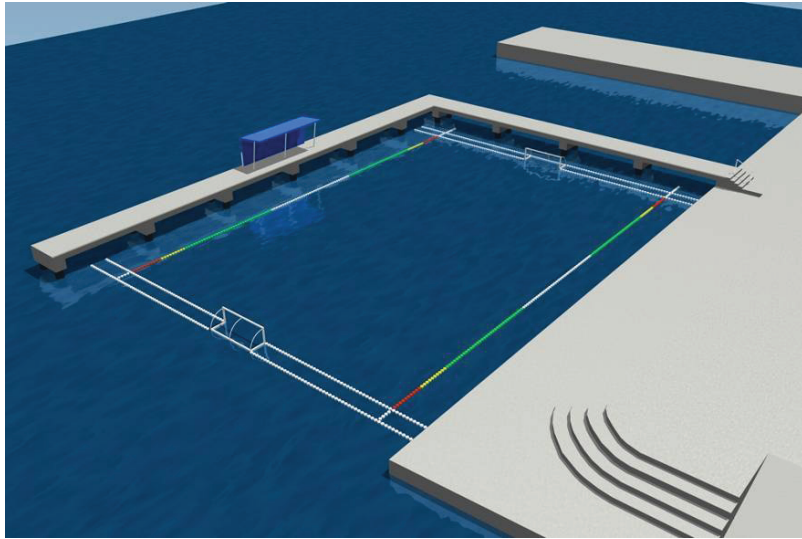
$$T_{H_{\max}} = 5,3 \text{ s (period vala)}$$

$$L_{H_{\max}} = 44,0 \text{ m (duljina vala)}$$

5. Tehničko rješenje konstrukcije

Raščlanjeni armiranobetonski gat je 'L' tlocrtnog oblika (slika 5) i sastoji se od rasponske konstrukcije, stupova i temelja.

Rasponsku konstrukciju čine AB predgotovljeni nosači iznad kojih se ugrađuje spregnuta AB ploča izvedena na licu mjesta. Po širini gata paralelno se postavljaju četiri glavna nosača (duljine 6,0 m, širine 40,0 cm i visine 25,0 cm), koji zajedno s tlačnom pločom debljine 15 cm čine spregnuti rasponski nosač. Montažni nosači se montiraju na AB naglavne grede (duljine 240,0 cm, poprečni presjek 70,0 x 60,0 cm), postavljene na dva kružna stupa (presjek $\Phi 50,0$ cm). Stupovi su na temeljima-samcima različitih dimenzija, po jedan temelj za par stupova. Kota temeljenja je prosječno oko 1,80 m ispod kote morskog dna, na kamenjaci izvedenoj od biranog kamenog materijala.



Slika 5. 3D vizualizacija rasčlanjenog armiranobetonskog gata u luci Volosko

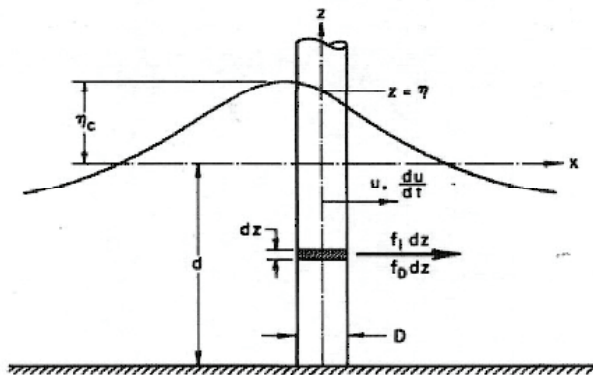
6. Analiza opterećenja

6.1. Statička opterećenja

Svi konstruktivni elementi su predviđeni od armiranog betona (specifična težina $25,0 \text{ kN/m}^3$). Korisno opterećenje za ovakav tip građevine prema EC1 iznosi $5,0 \text{ kN/m}^2$. S vanjske strane građevine predviđen je privez manjih plovila ($L < 8,0 \text{ m}$), čime se uvodi kontinuirano horizontalno opterećenje od $3,0 \text{ kN/m}^2$.

6.2. Hidrodinamičko opterećenje stupova

Za proračun opterećenja vala na uronjene stupove gata korišten je proračun po Morissonu (slika 6), pri čemu se ukupna sila sastoji od dvije komponente - sile inercije i sile strujanja.



Slika 6. Opterećenja kružnog stupa po Morrisonu [1].

6.3. Hidrodinamičko opterećenje rasponske konstrukcije

6.3.1. Provjera loma vala ispred gata

Praktičan uvjet da ne dolazi do loma vala s vanjske strane gata glasi:

$$d_b \geq 2.5 \frac{H_{\max}}{2} \rightarrow 5,5 \geq 2.5 \frac{4}{2} \rightarrow 5,5m \geq 5m. \quad (2)$$

gdje je d_b dubina mora, H_{\max} je visina maksimalnog vala. Dakle, budući je u predmetnom slučaju gornji uvjet zadovoljen, konstrukcija gata je opterećena nelomljenim valom.

6.3.2. Proračun opterećenja – dvije metode

Općenito, ukupni horizontalni pritisak na konstrukciju sastoji se od hidrostatske i hidrodinamičke komponente. Prema [1], veličina horizontalnog hidrodinamičkog opterećenja za nelomljeni val uobičajeno se proračunava prema slijedećoj formuli (Sainflou):

$$p_{dyn} = \frac{\rho g a_{sup}}{\cosh \frac{2\pi d}{L}}. \quad (3)$$

gdje je ρ gustoća mora, g ubrzanje sile teže, a_{sup} amplituda reflektiranog vala, d dubina mora, L dužina vala. Ukoliko visina rasponske konstrukcije iznad morskog raza onemogućava refleksiju dolaznog vala (što se može postići odgovarajućim izdizanjem građevine iznad morskog raza) amplituda reflektiranog vala je $a_{sup} = H_{\max}/2$.

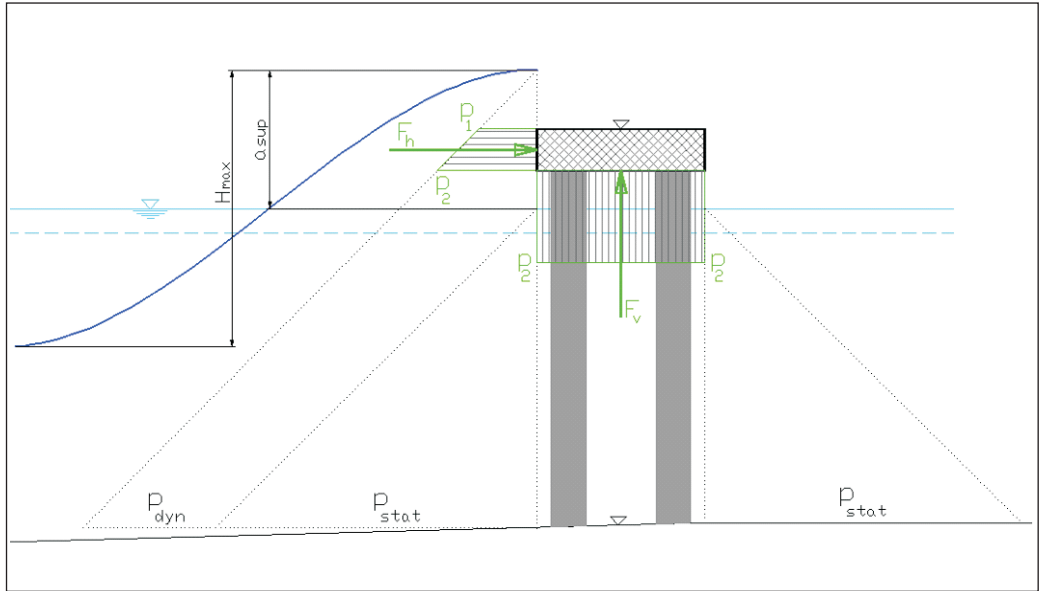
Pored analitičkog izraza za hidrodinamička opterećenja prema Sainflou, u literaturi postoje i alternativni izrazi [7,8,9] dobiveni na osnovi eksperimentalnih istraživanja/mjerenja tzv. kvazi-hidrostatskih sila na fizikalnim modelima raščlanjenih rasponskih konstrukcija izloženih kombiniranim horizontalnim i vertikalnim opterećenjima uslijed valovanja (slika 8).

Referirajući se na sliku 8, horizontalna i vertikalna komponenta hidrostatskog opterećenja računa se prema slijedećim izrazima:

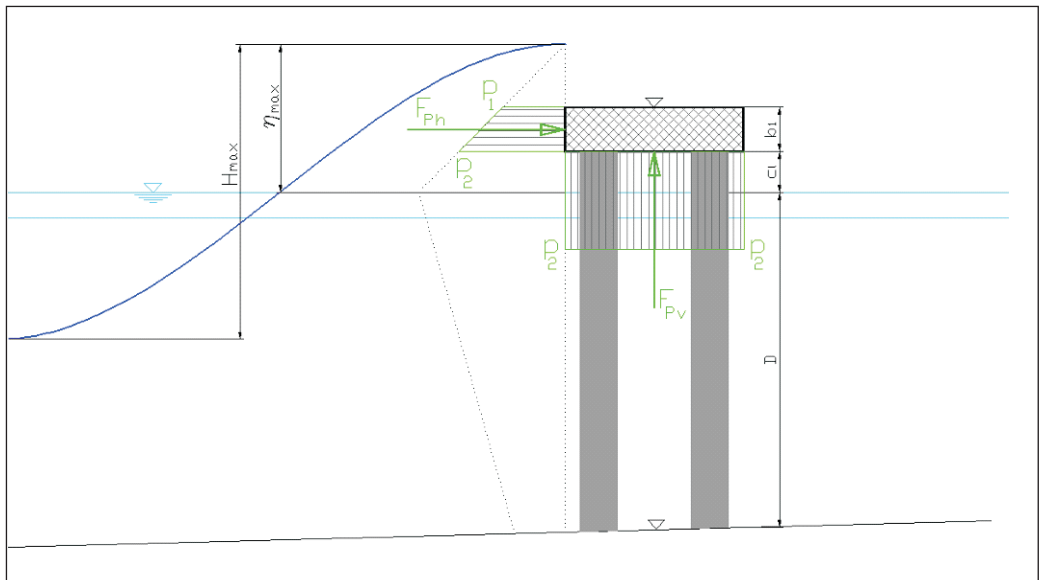
$$F_{Ph} = b_1 \frac{p_1 + p_2}{2}. \quad (4)$$

$$F_{Pv} = p_2 A_{pl}. \quad (5)$$

$$p_1 = \gamma_w (\eta_{\max} - c_l - b_1). \quad (6)$$



Slika 7. Dijagram opterećenja na AB gat (Sainflou)



Slika 8. Dijagram opterećenja na AB gat [8,9]

$$p_2 = \gamma_w(\eta_{max} - c_l). \quad (7)$$

$$\eta_{max} = (1.0 \div 1.3)H_s. \quad (8)$$

gdje je F_{ph} hidrostatska horizontalna sila (po metru dužnom), F_{pv} hidrostatska vertikalna sila, A_{pl} tlocrtna površina rasponske konstrukcije na čiji podgled djeluje val, γ_w specifična težina mora, η_{max} maksimalno izdizanje vala iznad srednjeg raza, H_s značajna visina vala.

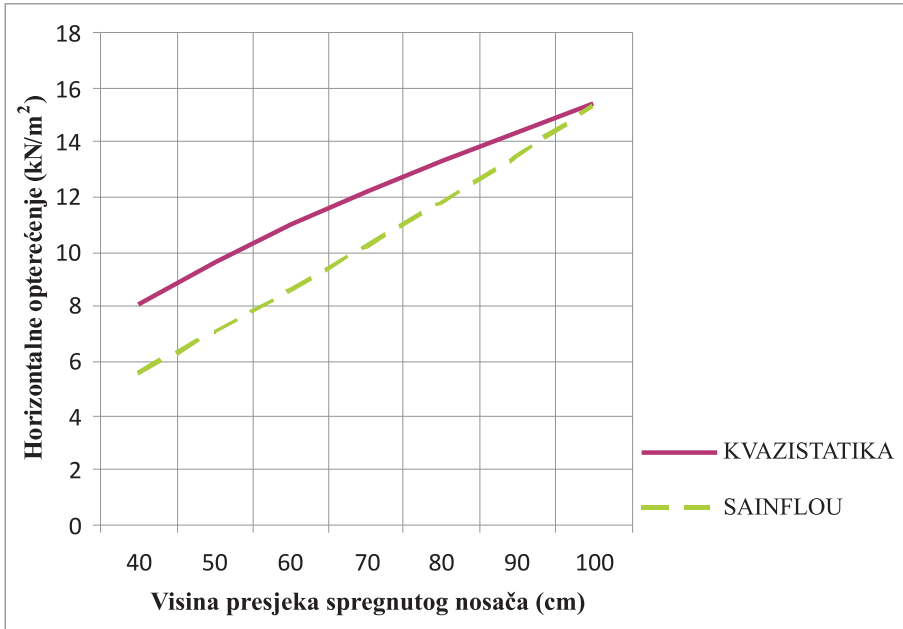
Kvazi-hidrostatsko opterećenje računa se na osnovu dobivenih hidrostatskih opterećenja korigiranih s koeficijentima dobivenim na osnovi ispitivanja na fizikalnom modelu, prema slijedećem izrazu:

$$F_{Pqs} = F_p \frac{a}{\left(\frac{\eta_{max} - c_l}{H_s} \right)^b} C_{up} \quad (9)$$

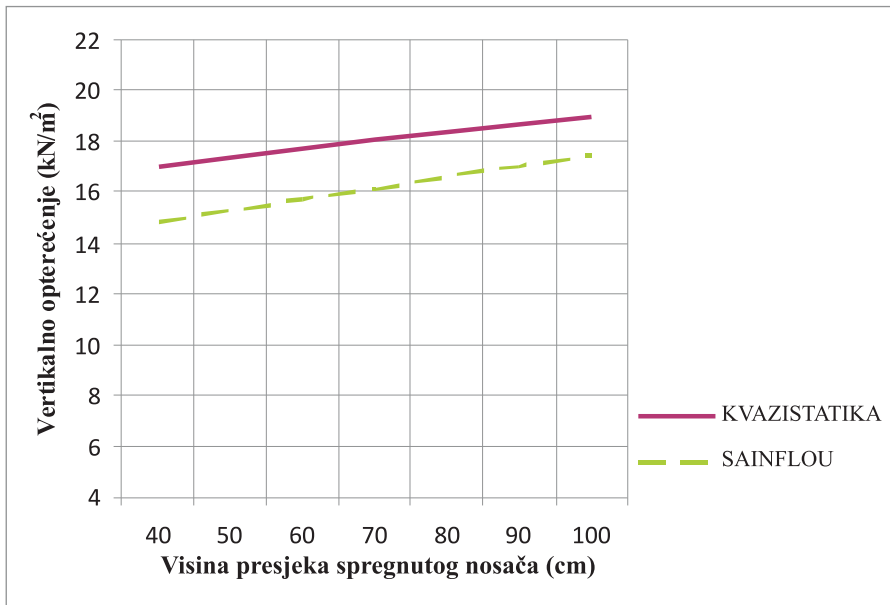
gdje je F_{Pqs} kvazi-statička sila, F_p hidrostatska sila, a i b bezdimenzionalni koeficijenti, η_{max} maksimalno izdizanje vala iznad srednjeg raza, c_l vertikalni razmak između srednjeg morskog raza i kote podgleda konstrukcije, H_s značajna visina vala, C_{up} koeficijent uvećanja uslijed statističke devijacije.

6.3.3. Usporedba opterećenja na rasponsku konstrukciju prema dvije metode

Vertikalna i horizontalna opterećenja na raščlanjenu rasponsku konstrukciju mogu se proračunati za različite visine presjeka glavnog rasponskog nosača. Uobičajeno, najmanja visina nosača određuje se na osnovi dozvoljenih progiba, što u predmetnom slučaju gata u Voloskom za raspon od 6,0 m iznosi 25,0 cm, odnosno 40,0 cm zajedno s visinom tlačne ploče (15,0 cm). Najveća visina spregnutog nosača određuje se na način da pri srednjem višem morskome razu nosač ne bude uronjen u more, što znači da najveća visina nosača može iznositi 100,0 cm. Na slikama 9. i 10. prikazana je usporedba rezultata za horizontalno i vertikalno opterećenje prema Sainflou (izraz (3)) i prema [7,8,9] (izraz (9)) za različite visine presjeka glavnog nosača.



Slika 9. Funkcionalna ovisnost horizontalnog opterećenja i visine glavnog nosača rasponske konstrukcije



Slika 10. Funkcionalna ovisnost vertikalnog opterećenja i visine glavnog nosača rasponske konstrukcije

Iz rezultata prikazanih na slikama 9 i 10 može se zaključiti da primjena alternativnih izraza za kvazi-statička opterećenja rezultira u nešto većim vrijednostima u odnosu na izraz prema Sainflou. Prosječno, povećanje za horizontalna opterećenja iznosi 21%, dok je za vertikalna opterećenja povećanje nešto manje i iznosi oko 12%.

Prema očekivanjima, vrijednosti horizontalnih i vertikalnih opterećenja rastu proporcionalno s povećanjem visine presjeka rasponskog nosača. Iako je proporcionalnost povećanja opterećenja primjetnija kod horizontalnih komponenti (zbog povećanja vertikalne površine na koju val bočno djeluje), trend povećanja zamjetan je i kod vertikalnih opterećenja na podgled rasponske konstrukcije, što je posljedica većeg stupnja uronjenosti presjeka pri nailasku vala na konstrukciju.

6.4. Kontrola stabilnosti

Najkritičnija provjera stabilnosti raščlanjenog tipa konstrukcije gata sadržana je u provjeri na prevrtanje, pri čemu koeficijent sigurnosti (izražen kao omjer stabilizacijskog momenta M_{st} i momenta prevrtanja M_{pr}) mora biti veći od 1,5.

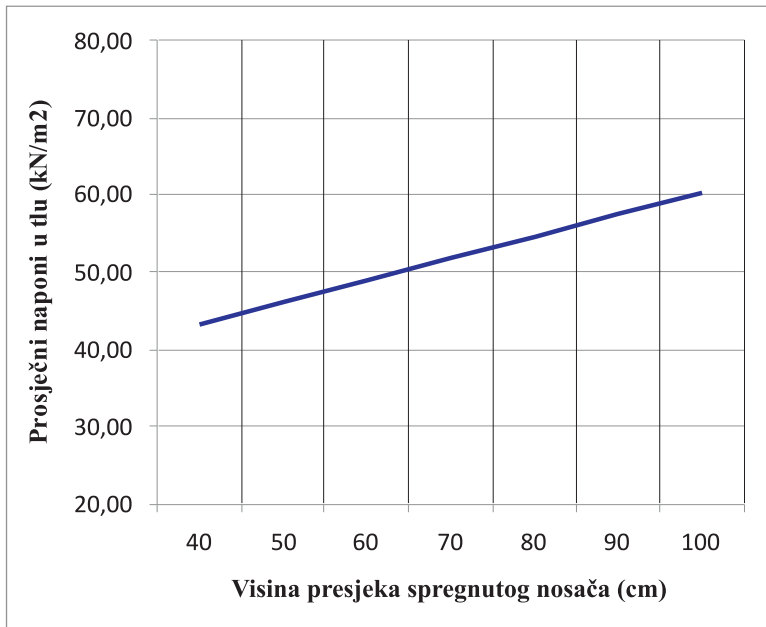
Općenito, stabilizacijski moment je moguće povećati dodavanjem mase raščlanjenoj konstrukciji što se može postići i povećanjem visine presjeka rasponskog nosača. S druge strane, moment prevrtanja rezultat je kombiniranog djelovanja horizontalnih i vertikalnih opterećenja od valova i moguće ga je smanjiti jedino odabirom rasponskog nosača manje površine podgleda i manje visine presjeka nosača.

Uobičajeni (konzervativni) pristup u projektiranju ovakvog tipa relativno laganih inženjerskih konstrukcija (posebno u uvjetima temeljenja na čvrstoj stijenskoj podlozi veće nosivosti) podrazumijeva povećanje ukupne mase konstrukcije, čime se jednostavno povećava otpornost konstrukcije na prevrtanje.

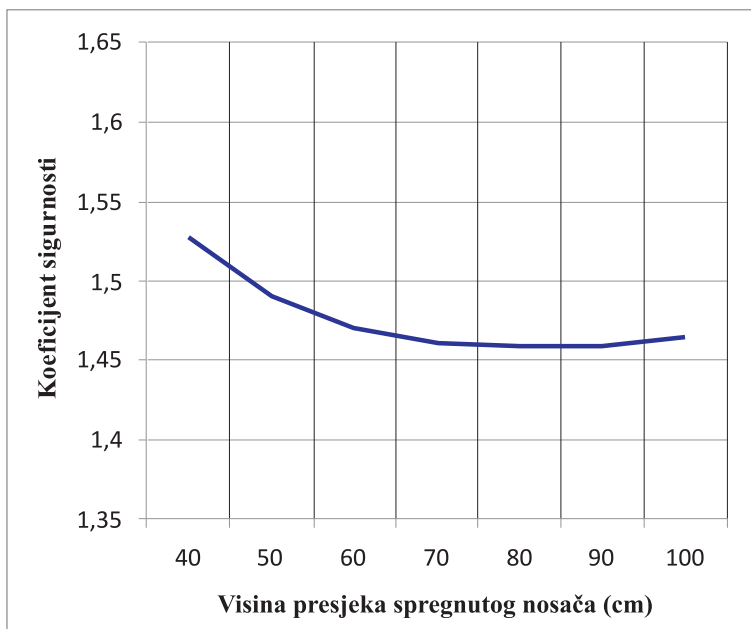
Međutim, u uvjetima kada dozvoljeni naponi u temeljnom tlu ograničavaju povećanje mase konstrukcije potrebno je iskoristiti sve raspoložive optimizacijske mogućnosti s ciljem smanjenja ukupne mase građevine, odnosno pritiska na temeljno tlo. Sastavni dio tog optimizacijskog procesa je i optimizacija mase rasponske konstrukcije, dakle i visine presjeka rasponskog nosača.

Referirajući se na gat u Voloskom, proračun napona u temeljnom tlu pri različitim visinama nosača rasponske konstrukcije rezultira u vrijednostima prikazanim na slici 11, dok su odgovarajući koeficijenti sigurnosti na prevrtanje prikazani na slici 12.

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da se s povećanjem visine presjeka (odn. mase) rasponske konstrukcije znatno povećavaju prosječni naponi u temeljnom tlu što, međutim, nije popraćeno odgovarajućim povećanjem koeficijenta sigurnosti na prevrtanje. Naprotiv, koeficijent sigurnosti na prevrtanje je najveći pri najmanjim visinama rasponskog nosača (slika 12).



Slika 11. Prosječni naponi u tlu ispod temelja gata u Voloskom, u funkciji visine presjeka glavnog rasponskog nosača.



Slika 12. Koeficijenti sigurnosti na prevrtanje gata u Voloskom, u funkciji visine presjeka glavnog rasponskog nosača.

Iz navedene analize na primjeru gata u Voloskom može se zaključiti da povećanje mase rasponske konstrukcije (tj. povećanje visine spregnutog nosača) ne djeluje pozitivno na ukupnu stabilnost građevine i to iz slijedeća dva razloga:

(a) pozitivni efekt povećanja mase je poništen negativnim efektima uslijed povećanja horizontalnih i vertikalnih opterećenja valom na bokove i podgled konstrukcije, čiji je viši presjek s povećanjem visine nosača sve bliže vodnom licu za vrijeme valovanja. Posljedično, registrira se skoro obrnuto proporcionalna veza između koeficijenta sigurnosti na prevrtanje i visine presjeka nosača.

(b) veća masa konstrukcije uzrokuje veće napone u temeljnom tlu, čime se riskira nejednoliko slijeganje, odnosno slom temeljnog tla za vrijeme valovanja.

Kombinacija prethodnih razmatranja može navesti na ideju o dodavanju mase u temeljima građevine, koji su u usporedbi s izloženim površinama u nadmorskom dijelu znatno manje pod utjecajem valovanja, no na taj način se ne mogu efikasno riješiti problemi uvjetovani ograničenjima u nosivosti temeljnog tla. Dakle, opet se kao jedino rješenje nameće odgovarajuće lagana konstrukcija čiji će oblik, odnosno izdignutost iznad morskog raza, rezultirati u optimalnoj kombinaciji opterećenja valovanjem i reakcije temeljnog tla na njime izazvane pritiske.

7. Izvedba

Nekoliko detalja tijekom izvedbe građevine gata (2007. godina) prikazano je na slikama 13-15.



Slika 13. Stupovi i naglavna AB greda



Slika 14. Predgotovljeni AB nosači rasponske konstrukcije



Slika 15. Završetak betoniranja tlačne AB ploče

Po završetku izvedbe glavnih betonskih radova, građevina gata je opremljena zaštitnom ogradom, mrežom i priveznim prstenovima te je započeto njezino korištenje za sportske (slika 16) i rekreacijske potrebe (slika 17).



Slika 16. Vaterpolo plivalište u luci Volosko



Slika 17. Gat kao dio javnog kupališta u Voloskom

8. Zaključak

Značajnim hidrodinamičkim opterećenjima uslijed valovanja na određenoj izloženoj lokaciji moguće se suprotstaviti samo na dva načina: masivnom (monolitnom) gradnjom ili, alternativno, odgovarajućim oblikovanjem lagane armiranobetonske, odnosno prednapregnute konstrukcije.

Pritom odgovarajuće oblikovanje podrazumijeva detaljnu analizu utjecaja valovanja i pažljivi izbor geometrijskih karakteristika onih konstruktivnih dijelova građevine koji su najizloženiji hidrodinamičkim opterećenjima. Na taj način se bez povećanja ukupne mase građevine mogu znatno smanjiti opterećenja uzrokovana valovanjem te posljedično, povećati ukupna stabilnost objekta bez da se pređu dozvoljena opterećenja na temeljno tlo.

Premda je u ovom radu najveća pažnja posvećena nosačima rasponske konstrukcije jednog izvedenog gata na izloženoj lokaciji u Riječkom zaljevu, sličan pristup može se primijeniti i na sve ostale elemente raščlanjene AB konstrukcije (npr. nosive stupove) koji se nalaze u zoni najvećih hidrodinamičkih utjecaja. Na taj način se mogu (a) postići jednaki, ili čak i bolji uvjeti stabilnosti u odnosu na masivnije konstrukcije, (b) smanjiti naponi na tlo ispod temelja, (c) smanjiti utrošak betona i armature i (d) osigurati da se najosjetljiviji dijelovi rasponske konstrukcije nalaze u većem dijelu godine izvan direktnog utjecaja mora.

Literatura

- [1] U.S. Army Corps of Engineers. *Coastal Engineering Manual*. U.S. Government Printing Office, Washington DC, 2002.
- [2] S. Kohlhas. *Oceanografske i pomorsko građevne osnove projektiranja luka*. prijevod na hrvatski, npublicirano
- [3] SMS 9.0 Tutorials. Brigham Young University, 2005.
- [4] U.S. Army Corps of Engineers. *How to Use CGWAVE With SMS*. U.S. Government Printing Office, Washington DC, 2004.
- [5] Z. Demirbiler, V. Panchang. *CGWAVE: A Coastal Surface Water Wave Model of the Mild Slope Equation - Technical Report*. U.S. Army Corps of Engineers & University of Maine, 1998.
- [6] Ž. Pernat. *Modeliranje valovanja zasnovano na rješavanju jednadžbe blagog nagib.*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, 2008.
- [7] S.L. Douglass, Q. Chen, J.M. Olsen. *Wave Forces on Bridge Decks*. University of South Alabama, 2006.

- [8] K.J. McConnell, N.W.H. Allsop, G. Cuomo, I.C. Cruickshank. *New Guidance for Wave Forces on Jetties in Exposed Locations*. COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka, 2003.
- [9] M. Tirindelli, G. Cuomo, W. Allsop, K. McConnell. *Exposed Jetties – Inconsistencies and Gaps in Design Methods for Wave-induced Forces*. Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, 2002.

Određivanje hidrograma otjecanja korištenjem HEC – HMS programa

Determination of runoff hydrogram using HEC-HMS application

Marin Mijalić*, Goran Volf, Nevenka Ožanić****

Sažetak. Razvoj informacijske tehnologije značajno je unaprijedio mogućnosti hidrološke analize. Snaga računala omogućila je da u relativno kratkom vremenu sagledamo više alternativa i na taj način odaberemo najbolje rješenje. Primjenom računala moguće je modelirati i situacije koje se u stvarnosti rijetko događaju (npr. pojava velikih voda – poplava). Takav način rada omogućuje hidrologu da se potpuno posveti određivanju rubnih uvjeta i rješavanju fizikalnog dijela problema, dok zadaću samog računanja obavlja računalo. Time se povećava mogućnost za određivanje i izbor originalnih, primjerenijih i kreativnih rješenja.

U ovom je radu prikazana primjena informacijskih tehnologija (HEC – HMS programa) na slivu Škurinjskog potoka, jedinog bujičnog vodotoka u urbanom središtu grada Rijeke. Prikazano je određivanje hidrograma otjecanja sa sliva Škurinjskog potoka na odabranim profilima. Isto tako, simuliran je i utjecaj različitih rješenja regulacije korita na hidrogram otjecanja sa sliva ovog bujičnog vodotoka. U izradi modela korišteni su geodetski i hidrološki podaci iz dostupnih, prethodno izrađenih elaborata.

Ključne riječi: HEC – HMS program, Škurinjski potok, hidrogram otjecanja, simulacija tečenja na slivu

* Hrvatske vode, Ulica grada Vukovara 220; 10000 Zagreb, Email: mmijalic@voda.hr

** Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, V.C. Emina 5, Rijeka, E-mail: goran.volf@gradri.hr, nozanic@gradri.hr

Abstract. Development of information technology in recent years has significantly improved the possibilities of hydrological analysis. It has enabled us to analyze multiple alternative ideas in a relatively short period of time and thus to select the best solution. It is possible to model the situation that in reality rarely occur (e.g. appearance of large water – flooding). Such mode of work allows hydrology experts to fully concentrate on determination of boundary conditions and on solution of the physical part of the problem, while the task of computing will be performed by computer. In such a manner opportunities for discovery of original, more appropriate and creative solutions are increased.

In this work the application of information technology (HEC – HMS application) on the basin of Škurinjski potok (stream) will be shown. The Škurinjski potok is the only torrent watercourse in the urban centre of the city of Rijeka. The determination of runoff hydrogram for Škurinjski potok (stream) will be shown for the selected profiles. Moreover, the impact of various solutions of the bed regulation on runoff hydrograms of this torrent watercourse will be simulated. For the construction of models available geodetic and hydrological data from previously created reports will be used.

Keywords: HEC – HMS application, Škurinjski potok (stream), runoff hydrogram, catchment area flow simulation

1. Uvod

Čovjek je oduvijek težio tome da istražuje svijet oko sebe i pokušavao razumjeti kako on funkcionira. Kruženje vode u prirodi jedna je od pojava koje su presudne za opstanak čovječanstva, a hidrologija je znanost koja se bavi upravo tom problematikom. Informacijska tehnologija nam omogućava da kompleksne probleme rješavamo relativno brzo i u realnom vremenu. Računalo nam daje mogućnost da se ekspert (u ovom slučaju hidrolog) posveti traženju mogućih rješenja, dok računalo izuzetno brzo vrši proračun za svaku soluciju i time štedi i vrijeme i novac. Takvim načinom rada potiče se kreativnost, te se daje mogućnost pronalazjenja novih i originalnih rješenja.

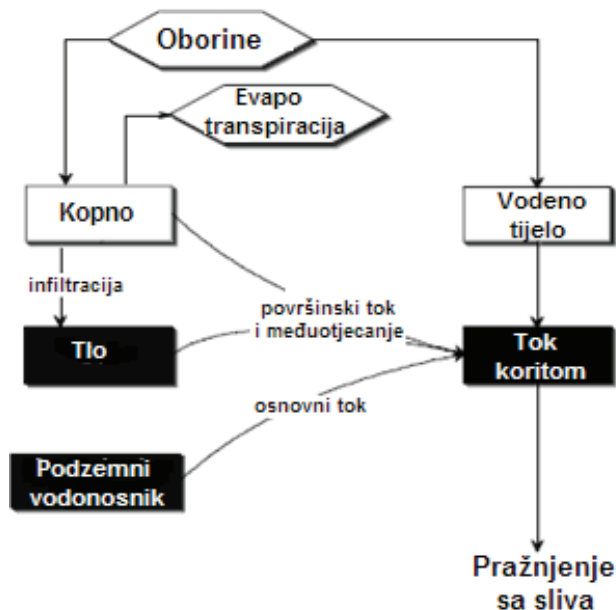
U radu je prikazana primjena računarske tehnologije pri određivanju hidrograma otjecanja sa sliva Škurinjskog potoka u Rijeci. U izradi je korišten programski paket HEC-HMS – The Hydrologic Modeling System, razvijen od strane američke vojske [1].

Cilj rada je izrada specifičnog matematičkog modela kojem je izlazni rezultat hidrogram otjecanja na analiziranom profilu Škurinjskog potoka u Rijeci. U izradi modela korišteni su podaci iz elaborata “Idejni projekt uređenja Škurinjskog potoka uzvodno od stacionaže 2+760 (lokacije rasadnika “Parkovi” d.o.o. Rijeka)”; [2], te diplomskog rada „Određivanje hidrograma otjecanja korištenjem HEC – HMS programa“ [3]. Moramo međutim napomenuti da izmjereni podaci o hidro-

geološkim karakteristikama tla ne postoje, te su okvirno određeni iz literature. Za izradu prihvatljivog matematičkog modela za neko područje potrebno ga je optimizirati pomoću vrijednosti analiziranih parametara koji su izmjereni na slivu. Zbog nedostatka izmjerenih podataka vrijednosti iz spomenutog Idejnog rješenja su uzete kao referentne. Svakako treba naglasiti da bi se za dobivanje preciznijih i upotrebljivih rezultata trebala vršiti dugotrajna mjerenja na terenu, te na osnovu njih izvršiti hidrološke i hidrogeološke analize istih. U ovom radu dan je kratak prikaz programa HEC-HMS, opis izrade matematičkog modela za određivanje hidrograma otjecanja, teorijska podloga za njegovo korištenje, te način određivanja hidrograma otjecanja sa sliva Škurinjskog potoka na odabranim profilima uz pomoć HEC-HMS programa.

2. Modeliranje hidroloških procesa u programu HEC-HMS

Simulacija procesa otjecanja matematičkim modelima, ovisi prvenstveno o problemu kojeg rješavano. Tako će za studiju o prenamjeni zemljišta neke veće površine trebati detaljniji model koji uključuje evapotranspiraciju, infiltraciju, kretanje vode kroz tlo, dok će za određivanje maksimalnog protoka biti dovoljno simulirati površinsko otjecanje za određeni povratni period pale oborine. Na slici 1 prikazan je pojednostavljeni hidrološki ciklus u HEC-HMS modelu pogodan za modeliranje većine problema.



Slika 1. Hidrološki ciklus [4]

Neovisno o problemu kojeg rješavamo moramo napraviti model sliva. U tu svrhu dostupan je skup alata koji nam omogućuju modeliranje podsliva, čvorišta, retencija i sl.

Nakon što smo napravili model sliva definiramo meteorološki model. U tu kategoriju ubrajaju se oborine koje se mogu modelirati na više načina (stvarni podaci za neko vremensko razdoblje, hipotetička oluja određenog p.p. i sl.). U meteorološki model ulaze i podaci o evapotranspiraciji i otapanju snijega. Ovisno o problemu kojeg rješavamo odaberemo model za simulaciju otjecanja i kontrolne specifikacije (za koje razdoblje računamo otjecanje). Modeli za simulaciju otjecanja podijeljeni su u četiri kategorije:

1. Modeli za proračun volumena otjecanja (infiltracija),
2. Modeli za proračun površinskog otjecanja,
3. Modeli za proračun baznog otjecanja,
4. Modeli za proračun toka u kanalima.

Konačni rezultat proračuna je hidrogram otjecanja sa sliva. Tako dobiveni hidrogram može se usporediti sa izmjerenim podacima (za slučaj kada ih imamo). Program HEC-HMS može automatski vršiti korekcije parametara na osnovu izmjerenih podataka i tako što bolje prilagoditi model stvarnom slivu.

3. Sliv Škurinjskog potoka

Škurinjski potok jedan je od rijetkih prirodnih bujičnih vodotoka na području grada Rijeke (Slika 3). Donji dio toka, do stacionaže 2+760 je natkriven i prolazi užim gradskim područjem. Gornji dio toka je otkriven i dijelom reguliran. U ovom radu obrađivano je područje iza stacionaže 2+760 tj. otvoreni dio potoka. Na stacionaži 2+760 nalazi se ulaz u natkriveni dio potoka. Na samom ulazu u zatvorenu dionicu postavljena je zaštitna rešetka. Za tu je stacionažu u Idejnom rješenju od 2002. godine dobiven hidrogram otjecanja otvorenog sliva Škurinjskog potoka i on predstavlja konačni izlazni podatak matematičkog modela. Sam sliv Škurinjskog potoka podijeljen je na četiri dijela. Podjela je istovjetna onoj u spomenutom idejnom rješenju [2] radi lakše kontrole rezultata:

- Sliv I-I: Sliv najuzvodnijeg potencijalnog pregradnog profila (stacionaža 4+238,00)
Površina: 1,386 km²
- Sliv I-I do II-II: Međusliv između profila I-I i II-II (od 3+975,30 do 4+238,00)
Površina: 0,25 km²

- Sliv II-II do III-III: Međusliv između profila II-II i III-III (od 2+760,00 do 3+975,30)
Površina: 0,558 km²
- Sliv IV-IV: Podsliv koji se drenira Osječkom ulicom
Površina: 0,69 km²

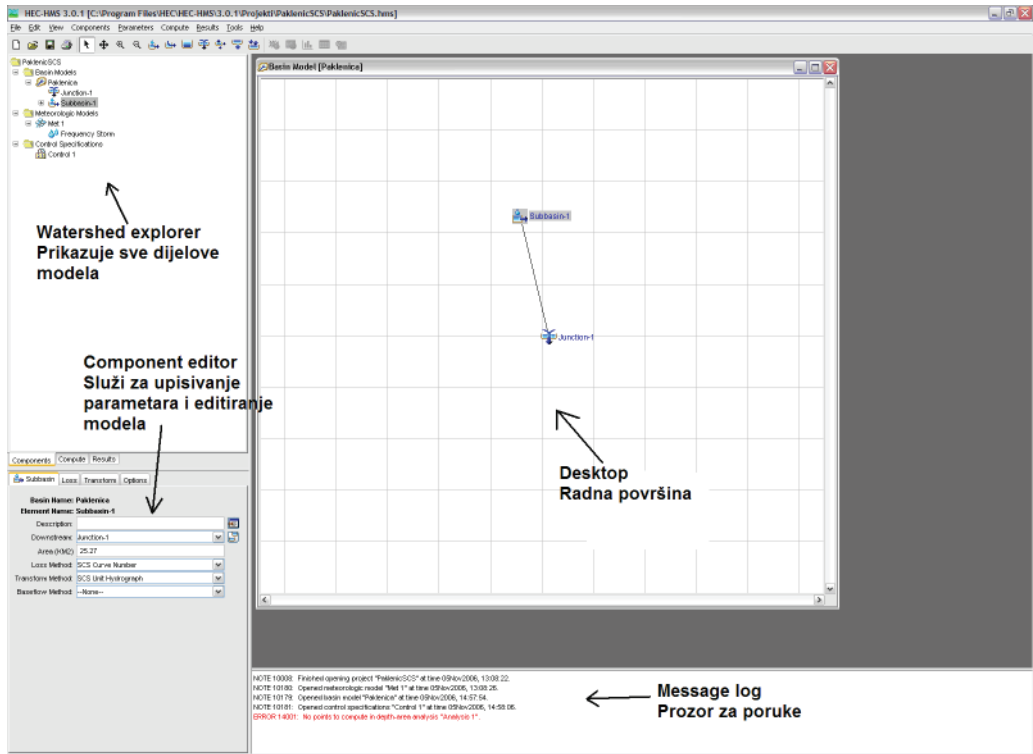
Iako se sliv nalazi gotovo u centru grada, izgrađenost je relativno mala. Ona iznosi oko 10 % za sve navedene slivove osim IV-IV gdje je 25 %. Šume i livade prekrivaju veći dio otvorenog dijela sliva, tako da je otjecanje uglavnom neizraženo, a infiltracija velika. Izgradnjom objekata prema važećem prostornom planu smanjiti će se infiltracija, a povećati otjecanje. Detaljnija hidrogeološka ispitivanja terena nisu vršena pa su hidrogeološki i geološki parametri tla preuzeti iz literature. Za svaki podsliv izračunat je zasebni hidrogram otjecanja metodama temeljenim na fizikalnim parametrima. Sam vodotok je dijelom reguliran, te su u modelu korištene prosječne dimenzije kanala.

4. Izrada modela Škurinjskog potoka

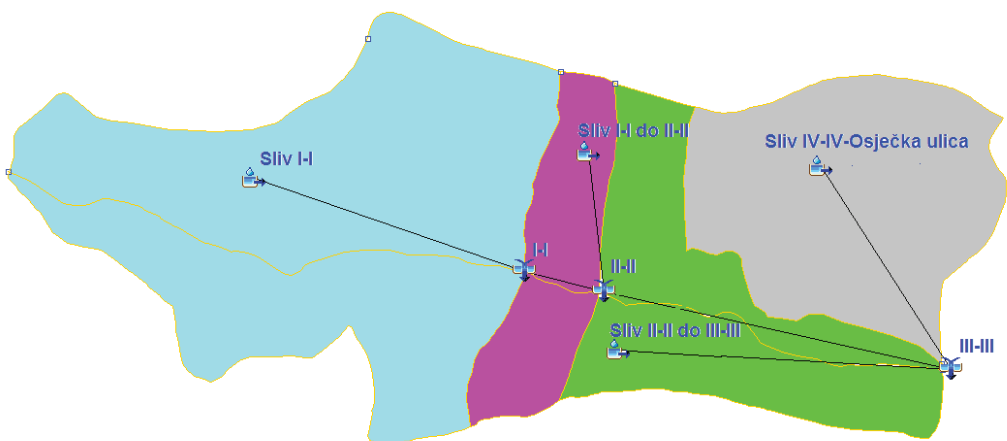
Programski paket HEC-HMS je veoma složen i svaki element modela može biti opisan na više načina. U ovom radu detaljnije će se opisati samo oni dijelovi programa koji su korišteni za izradu modela otjecanja sa sliva Škurinjskog potoka.

Samo korisničko sučelje programa sastoji se od menija s padajućim izbornicima, alatne trake i četiri prozora (Slika 2). Model analiziranog sliva grafički je predstavljen elementima koji su smješteni na radnoj površini. Sam smještaj elemenata nije bitan već samo veze među njima tj. način na koji su elementi međusobno povezani. Karakteristike svakog elementa definirane su numerički.

Na početku se u program unesu geometrijski elementi koji u stvarnosti opisuju sliv (Slika 3). Pomoću alata za modeliranje u HEC-HMS dodani su na radnu površinu elementi koji predstavljaju podslivove i njihov međudnos. Elementi I-I, II-II i III-III predstavljaju čvor (junction) i služe za međusobno povezivanje slivova. Kada povezujemo elemente uvijek biramo uzvodni te ga povezujemo sa nizvodnim elementom. Tako je sliv I-I povezan sa elementom I-I, sliv I-I do II-II sa elementom II-II na koji je također povezan element I-I (dakle na element II-II dolazi protok sliva I-I i sliva I-I do II-II). Slivovi II-II do III-III, IV-IV Osječka ulica i element II-II su povezani na krajnji element III-III koji predstavlja ulaz u zatvoreni dio Škurinjskog potoka.



Slika 2. Izgled korisničkog sučelja [5]



Slika 3. Model sliva Škurinjskog potoka [1]

Nakon što su opisane veze među podslivovima, trebalo je definirati njihove karakteristike. Najprije unijeti površinu sliva (*area*) u km² i odabrati metode kojima će se vršiti proračun. Kada je sliv u pitanju tada u obzir dolazi model infiltracije, model površinskog otjecanja i model baznog toka. Budući da se u ovom slučaju radi o bujičnom vodotoku, bazni tok ne postoji. Za model infiltracije i površinskog otjecanja izabrane su metode koje ovise o fizikalnim karakteristikama sliva. To je bilo jedino rješenje budući da na slivu nisu vršena mjerenja protoka koja bi se mogla povezati s kišom koja je prouzročila taj protok.

4.1. Meteorološki model

Za dobivanje hidrograma otjecanja potrebno je definirati oborine koje predstavljaju ulazni podatak. Meteorološki modeli prikazani su u *Watershed Exploreru* pod *Meteorologic Models*.

Za svaki model koji dodamo treba definirati kako on opisuje oborine. To se u HEC-HMS-u može napraviti na više načina. Osim oborina kao meteorološki parametar u model ulaze i evapotranspiracija, te otapanje snijega. Najjednostavniji način definiranja oborina je upisivanje stvarne kišne epizode. To radimo tako da prvo dodamo podatke pomoću izbornika *Components – Time -Series Dana Manager – Precipitation Gages*.

U izborniku za *Time-Series Data* odredimo vremenski korak i razdoblje trajanja kišne epizode (npr. satne vrijednosti s kišomjerne stanice za kišu trajanja od jednog dana). Treba paziti na to da li su nam podaci kumulativni (*cumulative*) ili određeni kao razlika između dva vremenska koraka (*incremental*). Nakon određivanja vremenskog razdoblja i koraka podatke unosimo u tabličnom obliku (ručno ili kopiramo iz drugog dokumenta).

Nakon što smo unijeli sve podatke vratimo se meteorološkom modelu te pod *Precipitation* (oborina) izaberemo *specified hyetograph* (specifični hijetogram) te obavezno odredimo koja mjerna stanica utječe na koji podsliv. U ovom radu korištena je mogućnost definiranja oborine pomoću HTP krivulja. U HEC-HMS-u, ta se opcija naziva *Frequency Storm*. Tu biramo vjerojatnost pojave, trajanje intenziteta, trajanje kiše, poziciju intenziteta (kada se javlja maksimalna kiša) te visinu oborine za određeno trajanje [5]. U ovom su radu korišteni podaci o oborinama (1), (2) iz Idejnog rješenja (2002.). Za visinu oborine 100-godišnjeg povratnog perioda korištene su jednačbe [2]:

$$H = 106,66 \times t^{0,7471} \quad \text{za } 10 \text{ min} < t < 2,19 \text{ sati} \quad (1)$$

$$H = 63,005 \ln t + 141,96 \quad \text{za } 2,19 \text{ sati} < t < 24 \text{ sata} \quad (2)$$

Pomoću tih jednadžbi dobivene su visine oborina određenog trajanja za 100 god. povratni period (Tablica 1).

Tablica 1. Mjerodavne količine oborina 100-godišnjeg povratnog perioda za postaju Rijeka [2]

Trajanje oborine (h)	100 god. (mm)
0.083	16.7
0.25	37.9
1	106.7
2	179.0
3	211.2
6	254.8
12	298.5
24	342.2

4.2. Proračun gubitaka pomoću HEC-HMS

Program HEC-HMS koristi odvojene modele za proračun gubitaka. Nakon što su zadane oborine, potrebno je odrediti koliki dio tih oborina sudjeluje u površinskom otjecanju, budući da dio vode ostane zarobljen na površini i ne stigne do vodotoka, dio se infiltrira u tlo, a dio ispari. Treba napomenuti da HEC-HMS razlikuje dvije vrste površina:

- Nepropusna površina – nema nikakvih gubitaka, sva pala oborina otječe izravno u vodotok,
- Propusna površina – dio oborine infiltrira se u podzemlje.

Model koji računa izgublenu oborinu naziva se *Loss Method*. Postoji više metoda za izračun gubitaka (SCA, početni i konstantni, Green i Ampt i dr.). Kod svake metode računa se gubitak za svaki vremenski korak simulacije te se izračunata količina oduzima od pale oborine za taj isti vremenski interval. Ostatak se smatra efektivnom oborinom. Za model infiltracije odabrana je metoda Green and Ampt (GA). Originalna metoda je modificirana tako da u obzir uzima gubitke na površini i oborine promjenjiva intenziteta. Zasniva se na fizikalnim parametrima te se većina vrijednosti dobiva mjerenjem na terenu. Kako takva mjerenja nisu provedena na slivu Škurinjskog potoka vrijednosti su preuzete iz dostupne literature. Za proračun GA modela HEC-HMS zahtjeva sljedeće parametre:

- Početni gubitak (*Initial loss*) – Nije povezano sa površinskim prikupljanjem vode (surface ponding) kojeg program automatski računa već je povezano sa vodom koja ostaje na raslinju i sličnim zaprekama,

- Hidraulička vodljivost (*Hydraulic conductivity*) – Svojstvo tla koje nam kazuje kojom brzinom voda prodire u tlo,
- Usis na fronti ovlaženja (*Wetting front suction*) – Funkcija veličine pora i njihove distribucije,
- Volumni deficit vlažnosti (*Volume moisture deficit*) – Razlika između poroznosti i početnog sadržaja vlažnosti ($\Phi - \theta$). Početni sadržaj vlage mora biti između 0 i Φ .

Većina vrijednosti može jako varirati. Posebno se to odnosi na hidrauličku vodljivost. Za sliv Škurinjskog potoka odabrano je tlo visoke propusnosti. U tablici 2 dani su svi odabrani parametri za pojedini sliv.

Tablica 2. Vrijednosti GA parametara za sliv Škurinjskog potoka

Sliv Parametar	Sliv I-I	Sliv I-I do II-II	Sliv II-II do III-III	Sliv IV-IV
Početni gubitak (mm)	10	10	10	10
Deficit vlažnosti	0,424	0,424	0,424	0,424
Usisavanje (mm)	20,7	20,7	20,7	20,7
Hidraulička vodljivost (mm/sat)	110	110	110	110
Nepropusno (%)	9	9	9	25

4.3. Model proračuna otjecanja

4.3.1. Metoda kinetičkog vala

Ubrzana urbanizacija slivova u gradskim i prigradskim područjima primorala je stručnjake – hidrologe da razviju metode za rješavanje problema u urbanoj hidrologiji. Problemi su često toliko složeni, da iziskuju uporabu matematičkih modela. Pokazalo se da je teško odrediti potrebne ulazne parametre za izradu matematičkih modela na slivovima za koja ne postoje mjerenja. Zbog toga se razvila potreba da se proces otjecanja opiše pomoću geografskih karakteristika, te da se razvije metoda koja može opisati nelinearne karakteristike otjecanja. U tu se svrhu razvila metoda kinetičkog vala.

Iako jednostavna, metoda kinetičkog vala nudi prednost uvažavanja nelinearnosti bez potrebe za kompliciranim i skupim procedurama [3]. Za modeliranje nejednolikog strujanja potrebno je poznavanje brojnih parametara, metoda

kinetičkog vala povezuje karakteristike sliva i strujanja sa dva parametra, α i m . Ta dva parametra u izravnoj su vezi sa oblikom kanala (α), hrapavošću te nagibom kanala ili površine po kojoj voda teče (m). Metoda kinetičkog vala pokazala se preciznom i efikasnom za simulaciju utjecanja na manjim slivovima.

Kinematika proučava gibanje zanemarujući pritom utjecaj mase i sila za razliku od dinamike koja te utjecaje uzima u obzir. Poplavni val možemo identificirati kao jedan od dva odvojena valna fenomena: dinamički val i kinematički val. Iako su oba vala prisutna određene karakteristike sliva mogu kinematički val učiniti dominantnim. Kada su inercijalne sile i sile tlaka značajne, dinamički val opisuje kretanje dugog vala u plitkoj vodi. Kada inercijalne sile i sile tlaka nisu značajne za kretanje vala, tada kinetički val opisuje tok. Kod slučaja kinetičkog vala komponenti težine (sila u smjeru osi kanala koju stvara težina fluida koji se giba nizvodno zbog gravitacije) otpor pruža sila trenja. Takav tok neće osjetno ubrzavati te će ostati otprilike jednoličan. Neće biti vidljivog vala na površini, a promatraču će izgledati kao jednoličan porast i pad vodnog lica tijekom vremenskog razdoblja, pa kinematički val možemo klasificirati kao jednoliko nestacionarno strujanje [6].

Nestacionarno tečenje fluida u otvorenim koritima opisano je St. Venanovim jednadžbama (3), (4). To su parcijalne diferencijalne jednadžbe izvedene iz osnovnih principa održanja mase i energije.

$$\text{Jednadžba kontinuiteta: } \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = q_L + (i - f) \quad (3)$$

$$\text{Dinamička jednadžba: } \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g(S_0 - S_f) - q_L \frac{(u - v)}{y} \quad (4)$$

Gdje je:

y – dubina vode

q – jedinični protok

x – duljina mjerena u nizvodnom smjeru

u – komponenta brzine

i – intenzitet kiše

f – intenzitet infiltracije

S_0 – prosječni nagib dna

S_f – nagib energetske linije

q_L – ukupni bočni dotok po metru dužnom kanala

v – x komponenta brzine bočnog dotoka (zanemaruje se)

Članovi jednadžbe kontinuiteta jesu:

- Prirast razine
- Količina (storage)
- Bočni dotok
- Dotok efektivne oborine

Članovi dinamičke jednadžbe jesu:

- Akceleracija
- Brzinska visina
- Zakošenje dubine (depth taper)
- Razlika nagiba dna i vodne linije
- Bočni dotok

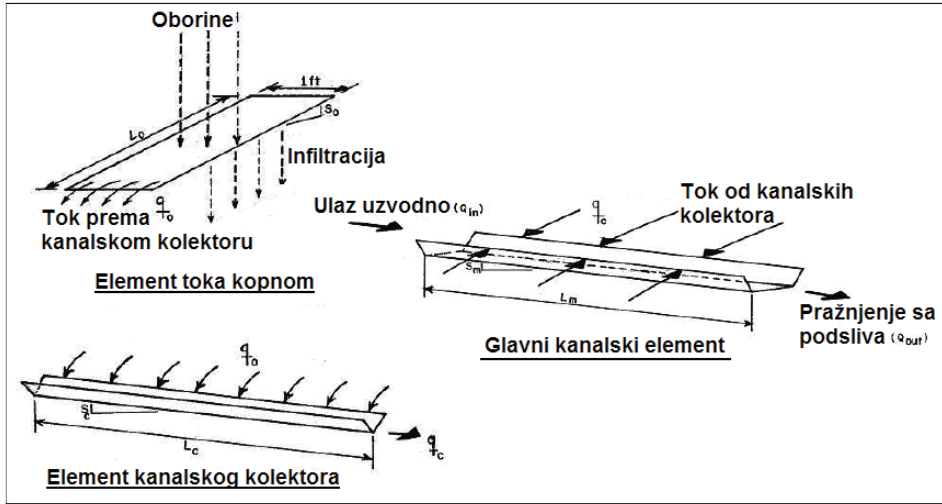
Navedene jednadžbe izvedene su za jednodimenzionalno strujanje. Pretpostavlja se također:

- 1) Brzina je konstantna i površina vode je horizontalna u bilo kojem poprečnom profilu
- 2) Vlada hidrostatski raspored tlakova tako da se vertikalna akceleracija zanemaruje
- 3) Uzdužna os aproksimirana je pravcem, ne javljaju se bočna strujanja
- 4) Nagib dna kanala je malen (manji od 1:10)
- 5) Stjenke kanala ne erodiraju
- 6) Otpor tečenju može se opisati Manningovom ili Chezyevom jednadžbom
- 7) Tok je nestišljiv i homogen

Kod kinetičkog vala zanemaruju se efekti ubrzanja i sile tlaka u odnosu na nagib dna i nagib energetske linije, tako da se jednadžba svodi na ravnotežu između sila trenja i sila gravitacije. Iz toga slijedi da je $S_f = S_0$. Pod tim uvjetima protok (5) možemo opisati kao funkciju dubine toka:

$$Q = \alpha A^m \quad (5)$$

Kod koje su α i m parametri koji opisuju sliv i strujanje. Kombinacijom te i Manningove jednadžbe možemo dobiti jednadžbu kinetičkog vala za široku plohu i plitki tok. Promotrimo tečenje po plohi jedinične širine (Slika 4).



Slika 4. Elementi koje koristi metoda kinetičkog vala [6]

Ako Manningovu jednadžbu koja glasi $Q = \frac{1}{n} R^{2/3} S_0^{1/2} A$ (6) primijenimo za plitki tok dubine y_0 na plohi jedinične širine dobiti ćemo da je protok (7) jednak:

$$Q = \frac{1}{N} S_0^{1/2} y_0^{5/3} \quad (7)$$

Koeficijent hrapavosti n zamijenili smo sa koeficijentom N koji predstavlja karakteristike površine po kojoj voda teče. Koeficijenti N dani su u tablici 3. Kako

se radi o jediničnoj širini možemo zamijeniti Q sa q te pisati $\alpha_0 = \frac{1}{N} S_0^{1/2}$ (8) iz toga slijedi izraz (9):

$$q_0 = \alpha_0 y_0^{m_0} \quad (9)$$

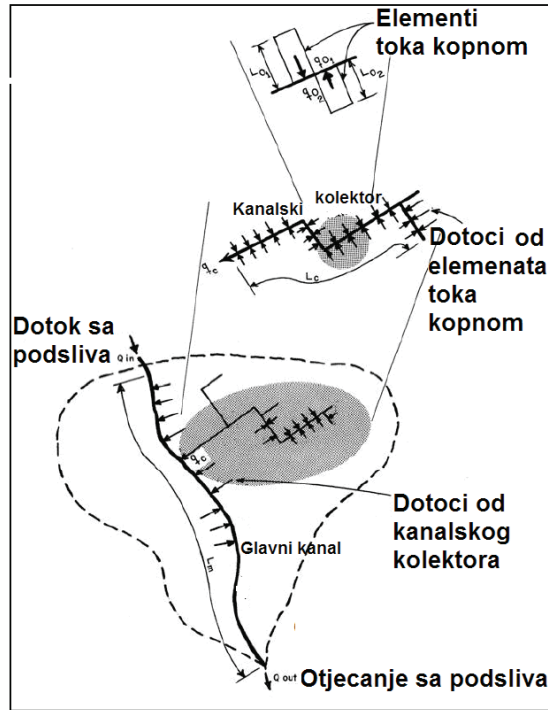
Jednadžba kontinuiteta (10) za taj slučaj glasi:

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} + \frac{\partial q_0}{\partial x} = (i - f) \quad (10)$$

Kombiniranjem te dvije jednadžbe dobiva se konačni izraz koji predstavlja jednadžbu kinetičkog vala (11) za ravnu plohu:

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} + \alpha_0 m_0 y_0^{(m_0-1)} \frac{\partial y_0}{\partial x} = i - f \quad (11)$$

Osim ravnih ploha jednadžbom kinetičkog vala opisuju se i kanali (Slika 4). Na slici 5 prikazane su međusobne veze između elemenata.



Slika 5. Međudnos elemenata sliva [6]

Za opisivanje mreže kolektora i kanala koriste se jednostavni poprečni presjeci poput trapeza, trokuta ili kruga. Voda koja ulazi u kolektore i kanale može biti iz gornjeg toka i/ili može dolaziti s površina okomitih na kanal. Te kanale opisujemo nagibom, duljinom, poprečnim presjekom, oblikom i Manningovim koeficijentom (standardni n za kanale). Jednadžbe kinetičkog vala za kanale i korita su (12):

$$\frac{\partial A_c}{\partial t} + \frac{\partial Q_c}{\partial x} = q_0 \quad (12)$$

$$Q_c = \alpha_c A_c^{m_c}$$

Gdje je:

- A_c – površina poprečnog presjeka
- Q_c – protok
- q_0 – bočni dotok po metru dužnom
- x – udaljenost mjerena duž uzdužne osi kanala
- α_c, m_c – parametri za određeni presjek, nagib i hrapavost

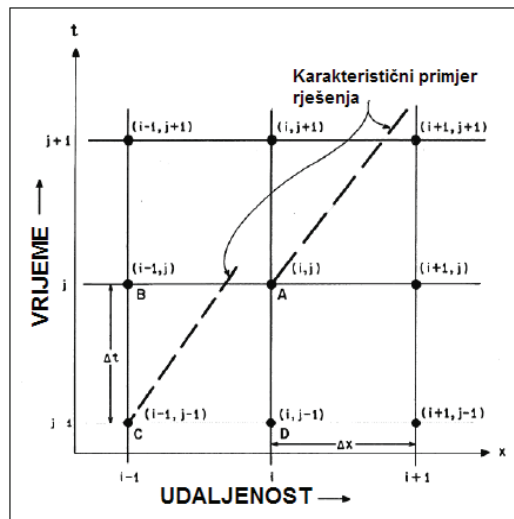
Vrijednosti parametara α_c i m_c dani su na slici 7 (vrijednosti za imperijalni sustav jedinica). Kombiniranjem tih dviju jednadžbi dobiva se izraz (13) u kojem je A_c jedina zavisna varijabla.

$$\frac{\partial A_c}{\partial t} + \alpha_c m_c A_c^{(m_c-1)} \frac{\partial A_c}{\partial x} = q_0 \quad (13)$$

Jednadžbe se rješavaju na isti način bez obzira radi li se o toku po ravnoj plohi ili toku kroz kanal:

- Parcijalna diferencijalna jednadžba aproksimira se shemom konačnih razlika
- Postavljaju se početni i rubni uvjeti
- Dobivene algebarske jednadžbe služe za izračun ordinata hidrograma

Za izračun metodom konačnih razlika koristiti ćemo se vremensko-prostornom mrežom (Slika 6).



Slika 6. Vremensko-prostorna mreža [6]

Kako su α_c i m_c konstante rješenje tražimo za A_c . Na vremensko-prostornoj mreži indeks j predstavlja vrijeme, a indeks i predstavlja prostor. Koordinata (i, j) predstavlja trenutne vremensko-prostorne koordinate. Buduće vrijeme i prostorna lokacija koje se mijenjaju u koracima Δt i Δx označene su sa $i+1$ i $j+1$, dok su prethodna označena sa $i-1$ i $j-1$. Pomoću ove sheme parcijalna diferencijalna jednadžba aproksimira se konačnim razlikama (poznato je stanje u prošloj vrijeme-prostor točki, a traži se u sadašnjoj). Jednadžbe u obliku konačnih razlika glase (14), (15) i (16):

$$\alpha m A^{m-1} \frac{\partial A}{\partial x} \approx \alpha m A^{m-1} \frac{\Delta A}{\Delta x} = \alpha m \left(\frac{A_{(i,j-1)} + A_{(i-1,j-1)}}{2} \right)^{m-1} \left(\frac{A_{(i,j-1)} + A_{(i-1,j-1)}}{\Delta x} \right) \quad (14)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} \approx \frac{\Delta A}{\Delta t} = \left(\frac{A_{(i,j)} - A_{(i,j-1)}}{\Delta t} \right) \quad (15)$$

$$q \approx \frac{q_{(i,j)} + q_{(i,j-1)}}{2} = \bar{q} \quad (16)$$

Konačan oblik (17):

$$\frac{A_{(i,j)} - A_{(i,j-1)}}{\Delta t} + \alpha m \left(\frac{A_{(i,j-1)} + A_{(i-1,j-1)}}{2} \right)^{m-1} \left(\frac{A_{(i,j-1)} + A_{(i-1,j-1)}}{\Delta x} \right) = \bar{q} \quad (17)$$

Jedina nepoznanica u toj jednadžbi je $A_{i,j}$ te je rješenje (18):

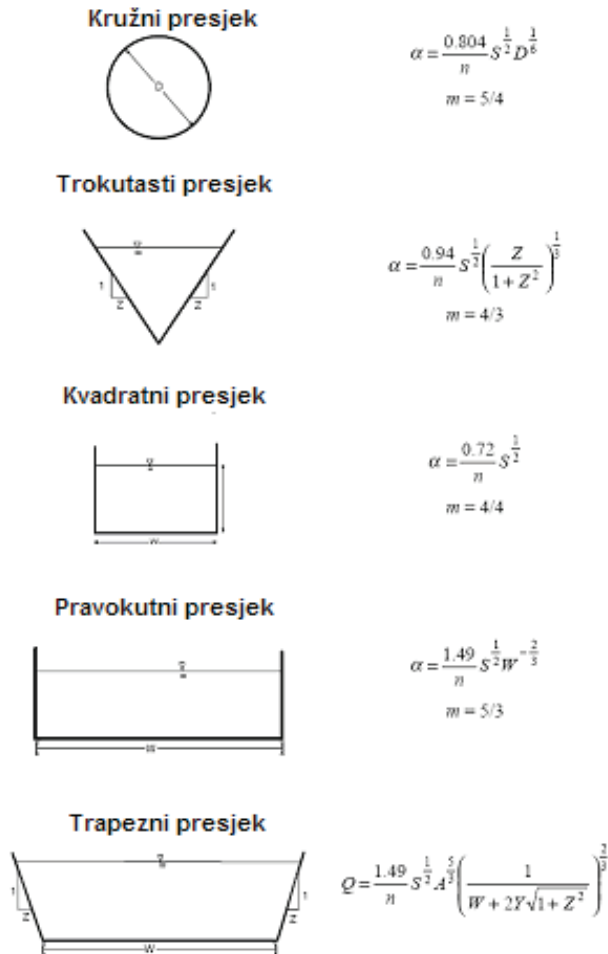
$$A_{(i,j)} = \bar{q} \Delta t + A_{(i,j-1)} - \alpha m \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\frac{A_{(i,j-1)} + A_{(i-1,j-1)}}{2} \right)^{m-1} (A_{(i,j-1)} + A_{(i-1,j-1)}) \quad (18)$$

Nakon što se izračuna $A_{i,j}$, protok se računa po formuli (19):

$$Q_{(i,j)} = \alpha (A_{(i,j)})^m \quad (19)$$

Tablica 3. Koeficijenti N za tečenje po ravnoj plohi

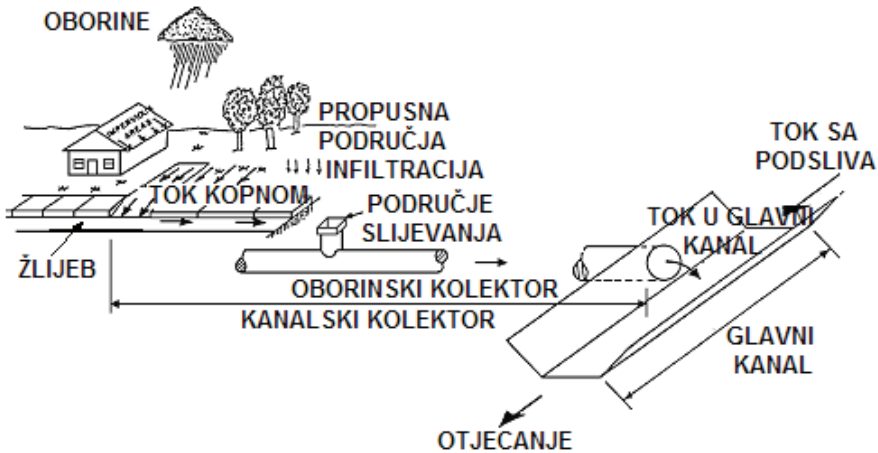
Opis površine	N
Glatke površine (beton, asfalt, šljunak...)	0,011
Neobrađena zemlja	0,05
Obradive površine:	
Rezidualni dio ≤ 20 %	0,06
Rezidualni dio > 20 %	0,17
Trava:	
Niska livadna trava	0,15
Gusta trava	0,24
Bermudska trava	0,41
Planinski obronci	0,13
Drveće:	
Rijetko grmlje	0,40
Gusto grmlje	0,80



Slika 7. Parametri α_c i m_c za kanale [6]

4.4. Model izračuna otjecanja u programu HEC-HMS – metoda kinetičkog vala na slivu Škurinjskog potoka

Nakon određivanja modela infiltracije i zadavanja oborine, slijedi izrada modela otjecanja. HEC-HMS nudi veliki izbor modela otjecanja. Mnogi od tih modela temelje se na teoriji jediničnog hidrograma (SCS, Clark, Snyder). Moguće je i samostalno definiranje jediničnog hidrograma i S-krivulja. U radu se za izradu modela otjecanja sa sliva Škurinjskog potoka koristila metoda kinetičkog vala. Kod ove metode svi zahtijevani parametri mogu se dobiti iz geometrije sliva. Ova se metoda pokazala dobrom za simuliranje manjih urbanih slivova. Na slici 8 shematski je prikazan tok vode u tipičnom urbanom slivu korišten u HEC programima.



Slika 8. Tok vode u tipičnom urbanom slivu [6]

Program HEC-HMS [1] je koristio metodu kinetičkog vala tako da je sliv podijelio na:

- Ravnine površinskog dotoka (*Overland flow plane*). Do dvije ravnine s kojih voda otječe u kanale. Ukupan tok s ravnina čini dotok u kanale.
- Podkolektori (*Subcollector channels*). Manje cijevi koje se spajaju na kolektor. Odvođe vodu s krovova, travnjaka, cesta itd. Pretpostavlja se da voda dotiče jednolično duž kolektora. Za svaki podkolektor određena je površina s koje voda dotiče.
- Kolektor (*Collector channels*). Veće cijevi u koje se ulijeva voda iz podkolektora. Također i za njih treba odrediti površinu s koje voda dotječe.
- Glavni kanal (*Main channel*). Prihvaća vodu iz uzvodnih podslivova te iz kolektora i površinskih ravnina.

Izbor elemenata ovisi o slivu, a minimum je jedna površinska ravnina i glavni kanal. U HEC-HMS se model otjecanja bira tako da se u *Watershed Exploreru* izabere sliv, a zatim se u *Component Editoru* pod *Transform Method* odabere kinetički val. Nakon izbora metode kinetičkog vala pojavili su se u *Component Editoru* elementi za definiranje kinetičkog vala. Pod Loss 1 i Loss 2 u editoru upisuju se parametri tla koje smo prethodno definirali kod izrade modela gubitaka. Program će prebaciti prethodno definirane parametre pod Loss 1 dok će Loss 2 ostati prazan. Indeksi 1 i 2 odnose se na prvu i drugu površinsku ravninu. Površinske ravnine definiramo pod Plane 1 i Plane 2 u editoru. Parametri koje treba upisati su:

- *Length* (m) – Duljina toka od ruba sliva do kanala. Uzima se prosječna vrijednost.
- *Slope* (m/m) – Nagib ravnine. Uzima se prosječna vrijednost.
- *Roughness* – Koeficijent hrapavosti N (opisano u prethodnom poglavlju)
- *Area* (%) – Postotak površine sliva kojeg predstavlja ta ravnina

Duljine toka i nagibi dobiveni su tako da su okomito na korito nacrtani pravci do ruba sliva. Pravci su nacrtani na otprilike jednakim udaljenostima. Izmjerene su duljine i nagibi pojedinih pravaca te je iz tih vrijednosti nađena srednja vrijednost. Koeficijent N odabran je iz tablice 2. Za svaki podsliv korištena je po jedna ravnina. Ukoliko postoje kolektori i podkolektori, također se definiraju u *Component Editoru*. Parametri za glavni kanal ne razlikuju se mnogo od parametara za kolektor. Parametri koji se traže su:

- *Length* (m) – Duljina kanala
- *Slope* (m/m) – Nagib kanala
- *Manning's n* – Manningov koeficijent hrapavosti
- *Area* (km²) – Dio površine sliva s koje voda otječe u kanal (osim za glavni kanal)
- *Shape* – Oblik poprečnog presjeka

Kod glavnog kanala postoji i opcija *Route Upstream* koja se uključi ako u kanal dotječe voda iz uzvodnog sliva. Sve tražene vrijednosti mogu se dobiti mjerenjem na karti ili na terenu. U tablici 4 dane su sve potrebne vrijednosti za definiranje metode kinetičkog vala na slivu Škurinjskog potoka.

Tablica 4. Parametri za metodu kinetičkog vala

Podsliv: Sliv I-I			
Ravnina		Kanal	
Duljina (m)	382	Duljina (m)	1690
Nagib	0,10	Nagib	0,1
Hrapavost	0,5	Hrapavost	0,04
		Presjek	Trapez
		Širina dna (m)	5
		Nagib obale	2:1
Podsliv: Sliv I-I do II-II			
Ravnina		Kanal	
Duljina (m)	500	Duljina (m)	260
Nagib	0,2	Nagib	0,5
Hrapavost	0,4	Hrapavost	0,04
		Presjek	Pravokutnik
		Širina dna (m)	7
Podsliv: Sliv II-II do III-III			
Ravnina		Kanal	
Duljina (m)	250	Duljina (m)	628
Nagib	0,2	Nagib	0,01
Hrapavost	0,4	Hrapavost	0,02
		Presjek	Pravokutnik
		Širina dna (m)	3
Podsliv: Sliv IV-IV			
Ravnina		Kanal	
Duljina (m)	300	Duljina (m)	100
Nagib	0,3	Nagib	0,01
Hrapavost	0,5	Hrapavost	0,02
		Presjek	Pravokutnik
		Širina dna (m)	2

4.5. Modeliranje ostalih elemenata sliva-retencija

U prethodnim poglavljima opisani su osnovni elementi koji su potrebni za modeliranje sliva. Osim tih elemenata postoji i cijeli niz elemenata kojima modeliramo specifične elemente sliva kao npr. retencije, dodatni izvori, ponori, kanali te skretanje dijela toka (detaljnije u [2]). Za ovaj je rad bilo potrebno modelirati retenciju budući da se ona nalazi na slivu Škurinjskog potoka na

stacionaži 3+975,30. Pregrada na toj stacionaži ima dvije betonske cijevi Ø600. U HEC-HMS retenciju kreiramo klikom na ikonu retencije, te zatim odaberemo mjesto na radnoj površini. Nakon imenovanja retencije ona se pojavljuje u *Watershed Exploreru*. Klikom na element retencije u *Component Editoru* prikazuju se opcije za definiranje retencije.

Najvažnije je odabrati metodu proračuna retencije (*Method*), koja može biti pomoću krivulja (Visina-Površina, Visina-Volumen, Visina-Protok, Volumen-Protok) ili se pak može zadati geometrija same retencije uz jednu krivulju (Visina-Površina ili Visina-Volumen). Uz to, određuje se i početni uvjet – početna visina ili dotok=izlaz. Opcija *Tailwater* služi za određivanje utjecaja donje vode na ispuštanje iz retencije, a dostupne su još i opcije o broju ispusta, preljeva, vrhu pregrade te broja pumpi. Kada određujemo elemente ispusta opisujemo njegov poprečni profil te hidrauličke karakteristike.

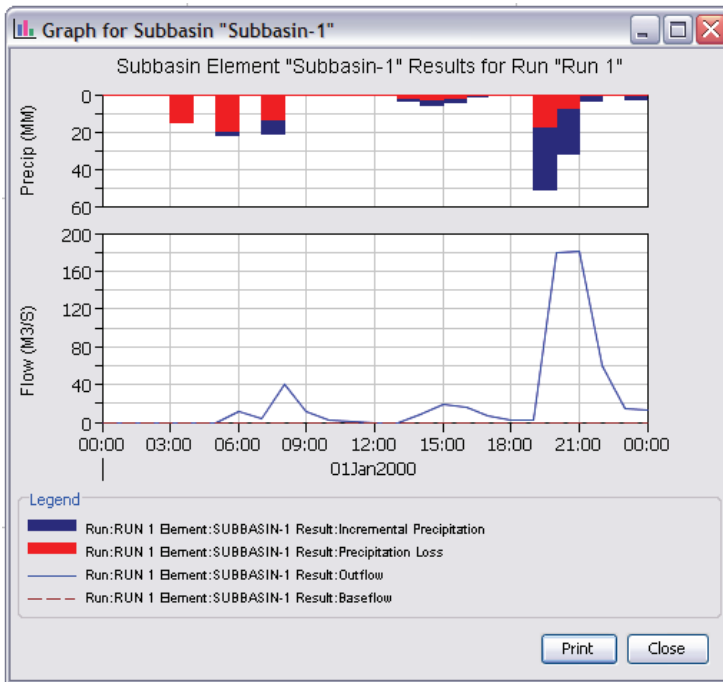
5. Modeliranje hidrograma otjecanja Škurinjskog potoka

Nakon definiranja potrebnih ulaznih parametara, potrebno je još odrediti postavke proračuna. Postavke proračuna se u HEC-HMS dodaju u izborniku *Components-Control Specifications Manager*. Dodavanjem postavke proračuna u *Watershed Exploreru* se pojavljuje stavka *Control Specifications*. Pomoću nje određujemo početak i kraj simulacije te vremenski korak. Vremenski korak (*Time Interval*) najvažnija je postavka. Ona utječe na rezultate jer predstavlja vremenski korak za sve jednadžbe (Δt) te je jedan od najvažnijih parametara.

Nakon definiranja svih potrebnih postavki, može se krenuti s proračunom. Prvo treba dodati novu simulaciju. To radimo tako da u izborniku *Compute* odaberemo *Create Simulation Run*. Odabirom *Create Simulation Run* otvoriti će se novi dijaloški okvir koji se sastoji od četiri koraka. Prvi korak je davanje imena simulaciji. Klikom na *Next* ide se na drugi korak u kojem treba izabrati koji se sliv koristi u simulaciji. U trećem koraku treba odabrati koji se meteorološki model želi koristiti. Posljednji korak je izbor postavki proračuna.

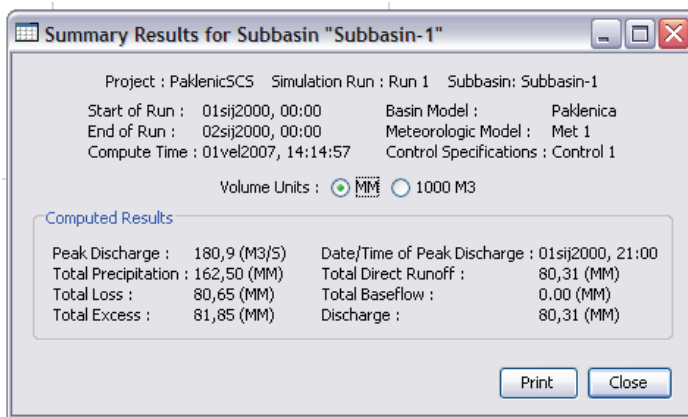
Dovršetak ovog postupka u *Watershed Exploreru* pod stavkom *Compute* pojavljuje se nova simulacija. U jednom projektu moguće je definirati više slivova, meteoroloških modela te kontrolnih specifikacija. To daje mogućnost da se ispita više kombinacija, na primjer, može se ispitati kako bi ista oborina utjecala na sliv kojemu je dodana akumulacija ili gledati razlike u otjecanju izazvanom raznim oborinama na istom slivu. To je ujedno i najveća prednost izrade modela jer daje mogućnost da ispitujemo više alternativa u malom vremenskom razdoblju. Naravno iskustvo hidrologa je presudno kod rada sa modelom jer pogrešno definirani parametri mogu dovesti do krivih rezultata, a njihova primjena mogla bi rezultirati katastrofom.

Proračun se može pokrenuti tako da se desnim klikom odabere simulacija u *Watershed Exploreru* te iz padajućeg izbornika odabere *Compute*. Ukoliko je sve u redu računalo će izvršiti proračun, a ako nije izbaciti će poruku o grešci. Rezultati su vidljivi u *Watershed Exploreru* pod stavkom *Results* ili se desnim klikom odabere određeni element na radnoj površini. Rezultati se mogu prikazati u grafičkom i tabličnom obliku. Kod grafičkog prikaza rezultata postoje dvije komponente, jedna prikazuje oborine dok je druga hidrogram otjecanja (Slika 9.). Kod oborina je crvenom bojom označena izgubljena (infiltrirana) oborina dok je plavom označena efektivna.



Slika 9. Grafički prikaz rezultata [1]

Tablični prikaz rezultata može biti sumarni ili za svaki vremenski korak. Sumarni prikaz govori koliko je ukupno palo oborine, koji dio te oborine je efektivan te koliki je i kada se pojavio vršni protok (Slika 10). Drugi oblik prikaza daje te vrijednosti za svaki vremenski korak. Moguće je dobiti i pojedinačni grafički prikaz određene varijable odabirom elementa u *Watershed Exploreru*. Također odabirom više elemenata moguće je na istom grafu iscrtati rezultate iz više simulacija.



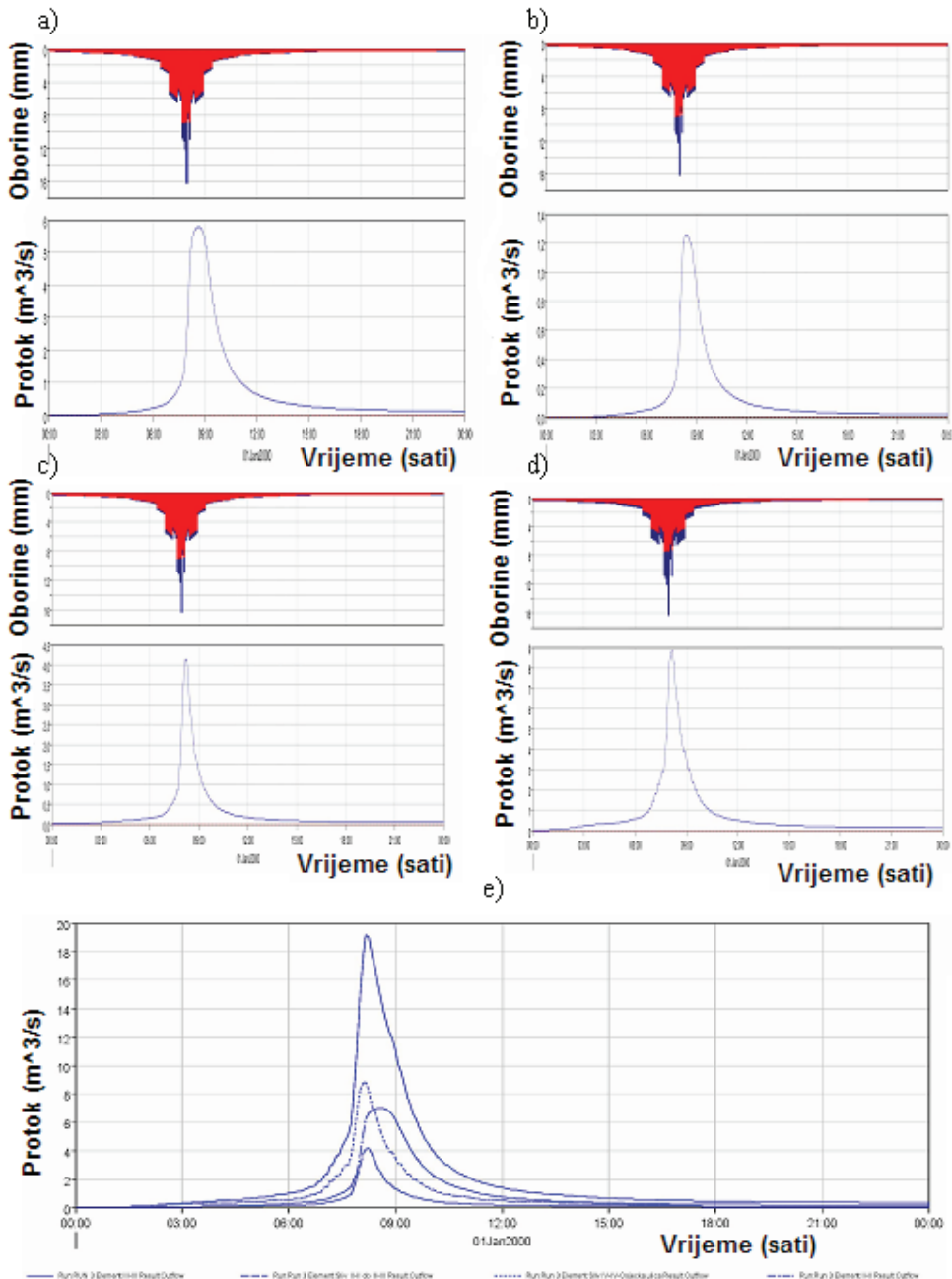
Slika 10. Sumarni prikaz rezultata [1]

5.1. Rezultati modeliranja za sliv Škurinjskog potoka

Za sliv Škurinjskog potoka izrađeno je više simulacija. One se prvenstveno razlikuju po meteorološkim modelima. Od meteoroloških modela koristile su se dvije realne kiše, te sintetička kiša za određeni povratni period.

Za prvu simulaciju se koristio meteorološki model sa sintetičkom kišom. Treba naglasiti da kod izrade sintetičkog hijetografa pomoću *Frequency storm* funkcije HEC-HMS generira jedan pljusak. Zasad nije moguće zadati neku drugu raspodjelu. Takva raspodjela oborine može dovesti do većih vrijednosti otjecanja nego što je realno za taj sliv. To se događa zbog toga što kod jednog velikog kontinuiranog pljuska prije dolazi do zasićenja nego kod više manjih pljuskova (pogotovo kod malih slivova). Rezultati su dani grafički za svaki podsliv posebno te za zaključni profil (ulaz u podzemnu dionicu). Rezultati prve simulacije dani su na slici 11.

Možemo zaključiti da se radi o malom slivu kratkog vremena koncentracije što i odgovara slivu Škurinjskog potoka. Također valja primijetiti da hidrogram podsliva IV-IV Osječka ulica vrlo strm i oštrog vrha što ukazuje na veliku vodonepropusnost tog dijela sliva. U tablici 5 dat je numerički prikaz rezultata za sve podslivove i zaključne profile.



Slika 11. Rezultati proračuna prve simulacije.

a) Rezultat proračuna prve simulacije za podsliv I-I, b) Rezultat proračuna prve simulacije za podsliv I-I do II-II, c) Rezultat proračuna prve simulacije za podsliv II-II do III-III, d) Rezultat proračuna prve simulacije za podsliv IV-IV; Osječka ulica, e) Rezultat proračuna prve simulacije za zaključni profil (Program HEC-HMS)

Tablica 5. Numerički prikaz rezultata za cijeli sliv [1]

Project: Skurinjev2 Simulation Run: Run 3

Start of Run: 01sij2000, 00:00 Basin Model: Basin 1
 End of Run: 02sij2000, 00:00 Meteorologic Model: 100 P.P. 5-24
 Compute Time: 04vel2007, 12:34:51 Control Specifications: 24h-5min

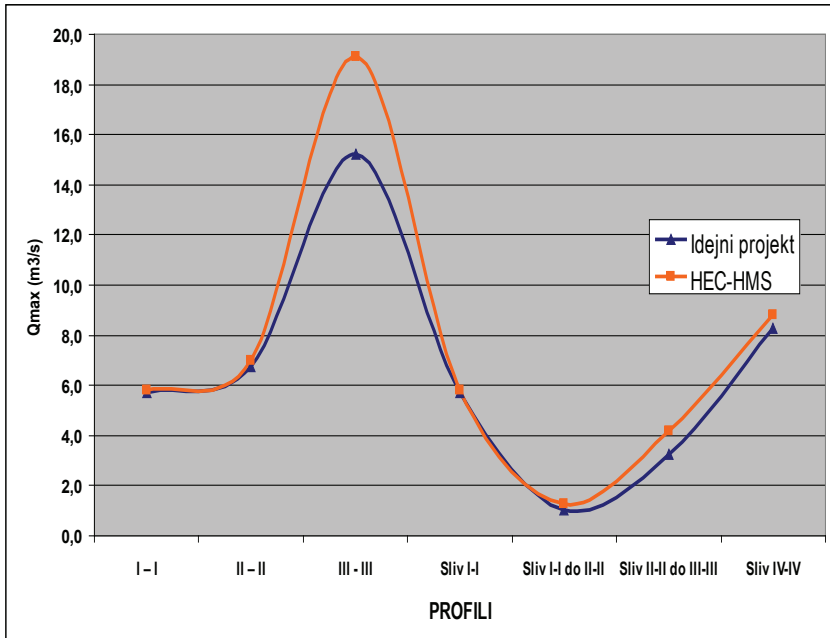
Volume Units: MM

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
I-I	1,386	5,8	01sij2000, 08:40	40,19
II-II	1,636	7,0	01sij2000, 08:35	40,23
III-III	2,884	19,1	01sij2000, 08:10	52,92
Sliv I-I	1,386	5,8	01sij2000, 08:40	40,19
Sliv I-I do II-II	0,250	1,3	01sij2000, 08:20	40,42
Sliv II-II do III-III	0,558	4,2	01sij2000, 08:15	40,77
Sliv IV-IV-Osječka ulica	0,690	8,8	01sij2000, 08:10	92,86

Kada se te dobivene vrijednosti usporede sa rezultatima proračuna maksimalnih protoka po SCS metodi u Idejnom projektu uređenja Škurinjskog potoka uzvodno od stacionaže 2+760,00 (lokacije rasadnika „Parkovi“ d.o.o. Rijeka (tablica 6 i slika 12), vidljivo je da su dobivene vrijednosti korištenjem HEC-HMS programa vrlo blizu proračunatih vrijednosti u spomenutom elaboratu, ali uvijek neznatno veće osim u slučaju Profila III-III koji predstavlja ukupan sliv otvorenog dijela toka Škurinjskog potoka u situaciji kada bi se u njega sprovele sve vode vlastitog sliva Škurinjskog potoka i oborinske vode koje se dreniraju Osječkom ulicom kada je razlika značajnija (slika 12). Razlog tome mogu biti svakako ulazni podaci i formule koje se koriste pri proračunu pojedinih parametara.

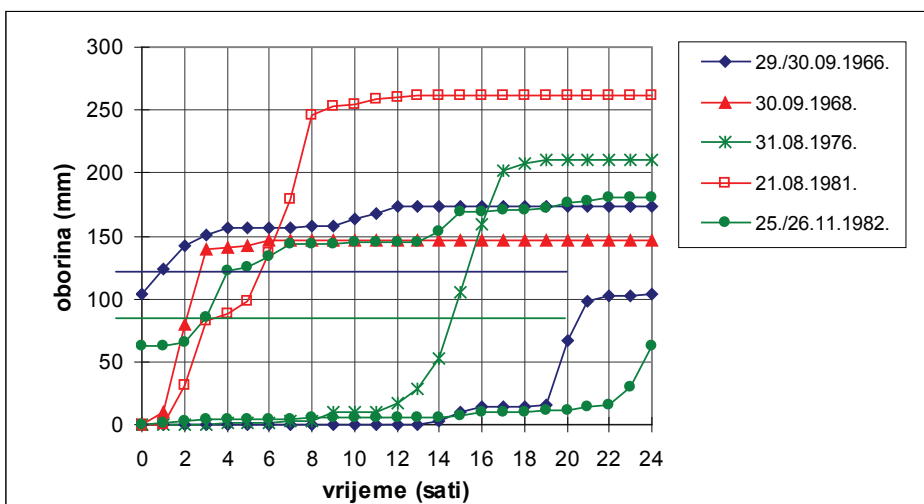
Tablica 6. Proračunate vrijednosti maksimalnih protoka [2]

PROFIL	Površina sliva (km ²)	Q ₂₀ (m ³ s ⁻¹)	Q ₅₀ (m ³ s ⁻¹)	Q ₁₀₀ (m ³ s ⁻¹)
I – I	1,386	1,20	3,17	5,71
II – II	1,636	1,41	3,75	6,74
III – III	2,884	3,82	9,19	15,22
Sliv I-I	1,386	1,20	3,17	5,71
Sliv I-I do II-II	0,250	0,22	0,57	1,03
Sliv II-II do III-III	0,558	0,70	1,83	3,23
Sliv IV-IV Osječka ulica	0,690	2,73	5,51	8,30

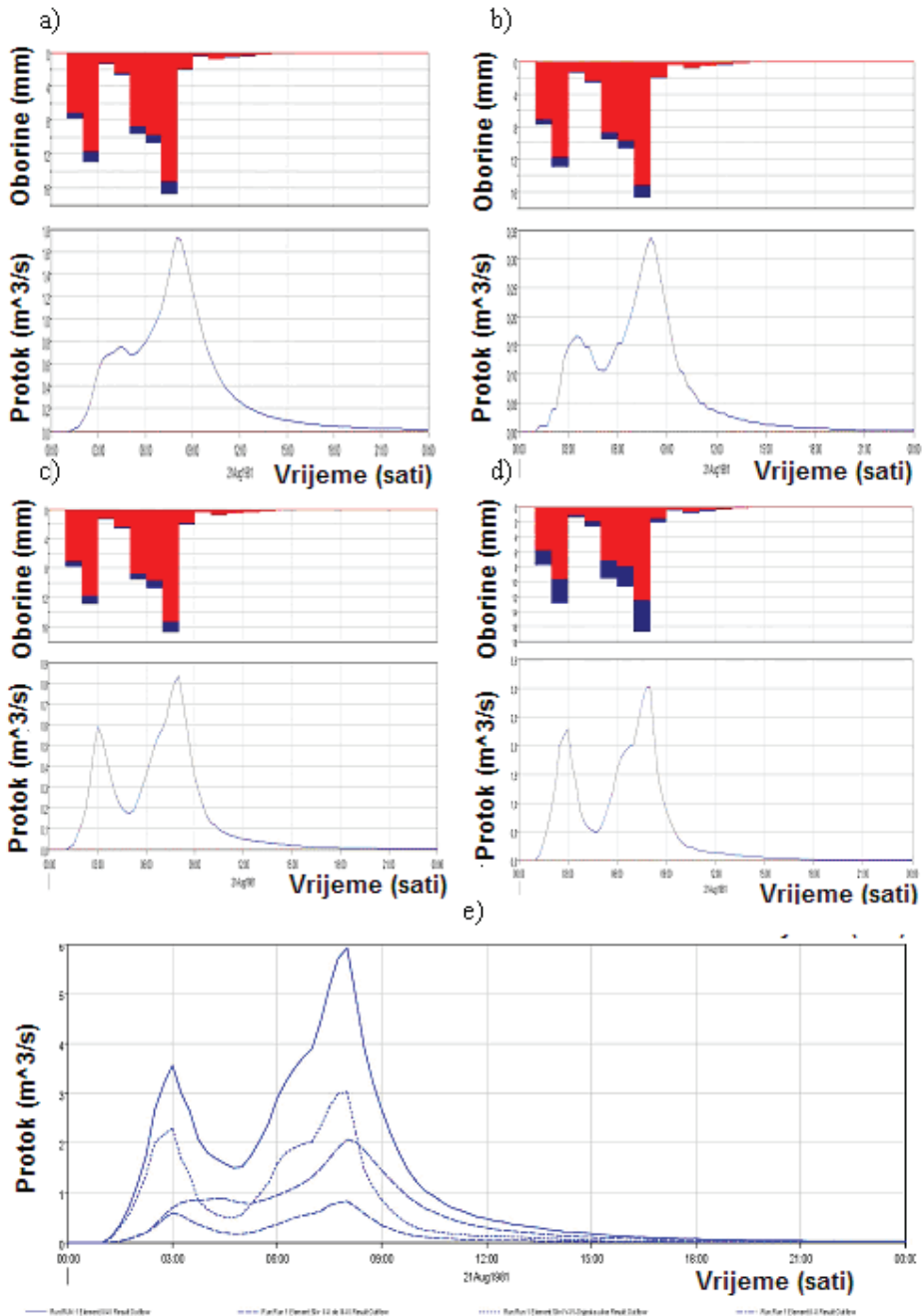


Slika 12. Usporedba Proračunatih maksimalnih protoka korištenjem SCS metode [2] i programa HEC-HMS [1]

Druga simulacija izrađena je za stvarnu kišnu epizodu koja se desila 21.08.1981. Oborina je dana za period od 24 sata s vremenskim korakom od sat vremena. Na slici 13 možemo vidjeti prikaz nekoliko kišnih epizoda. Na slici 14. dani su rezultati druge simulacije, te ulazni podatak o kišnoj epizodi u Rijeci (Slika 13).



Slika 13. Prikaz nekoliko kišnih epizoda u Rijeci [2]



Slika 14. Rezultati proračuna druge simulacije.

a) Rezultat proračuna druge simulacije za podsliv I-I, b) Rezultat proračuna druge simulacije za podsliv I-I do II-II, c) Rezultat proračuna druge simulacije za podsliv II-II do III-III, d) Rezultat proračuna druge simulacije za podsliv IV-IV; Osječka ulica, e) Rezultat proračuna druge simulacije za zaključni profil (Program HEC-HMS)

U tablici 7. dan je numerički prikaz rezultata za kišnu epizodu 1981.

Tablica 7. Numerički prikaz rezultata za kišu 1981. [1]

Project: Skurinjev2 Simulation Run: Run 1

Start of Run: 21kol1981, 00:00 Basin Model: Basin 1
End of Run: 22kol1981, 00:00 Meteorologic Model: 21.08.1981
Compute Time: 04vel2007, 16:10:42 Control Specifications: 1981

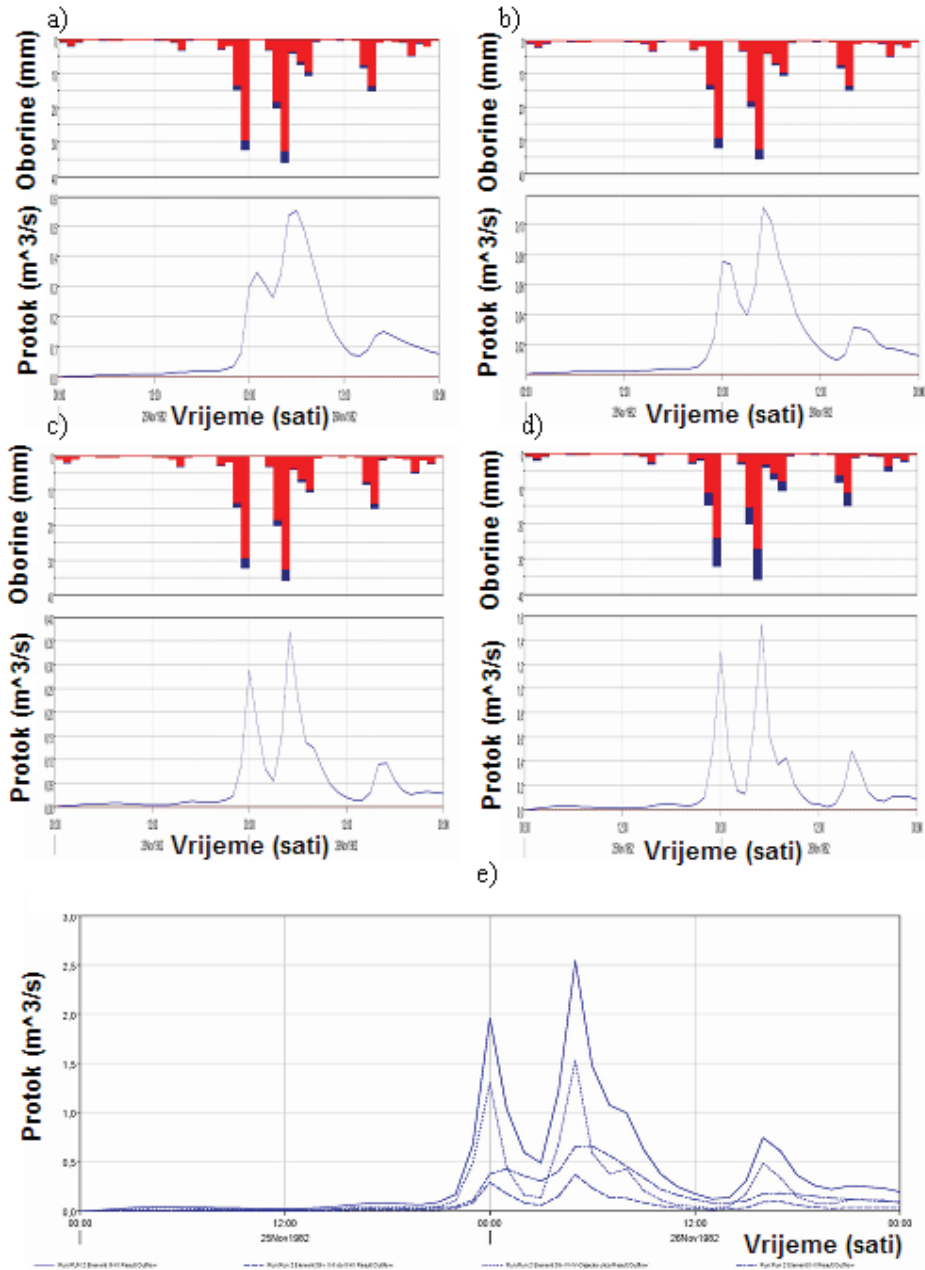
Volume Units: MM

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
I-I	1,386	1,7	21kol1981, 08:00	23,18
II-II	1,636	2,1	21kol1981, 08:00	23,19
III-III	2,004	5,9	21kol1981, 08:00	33,26
Sliv I-I	1,386	1,7	21kol1981, 08:00	23,18
Sliv I-I do II-II	0,250	0,3	21kol1981, 08:00	23,25
Sliv II-II do III-III	0,558	0,8	21kol1981, 08:00	23,28
Sliv IV-IV-Osjecka ulica	0,690	3,0	21kol1981, 08:00	65,22

Iz priloženih grafova možemo vidjeti kako za realnu oborinu dobivamo manji vrh hidrograma od onoga za sintetičku iako je količina pale oborina gotovo ista. To je posljedica raspodjele oborine i korištenja Green-Ampt metode za proračun infiltracije. Kod Green-Ampt metode infiltracijski kapacitet opada kako kiša pada dok prestankom oborine on ponovo raste kako voda otječe. Zbog toga kod dva pljuska dolazi do povećanja infiltracijskog kapaciteta između pljusкова.

Ovdje nije vršena usporedba sa rezultatima dobivenih u Idejnom projektu uređenja Škurinjskog potoka jer za stvarnu korištenu kišnu epizodu nije određen povratni period pa usporedba sa proračunatim maksimalnim protokama točno određenih povratnih perioda u spomenutom elaboratu nije imala smisla.

Treća simulacija napravljena je za kišnu epizodu 25./26.11.1982., a rezultati simulacije dani su na slici 15. U tablici 8 dan je numerički prikaz rezultata za kišnu epizodu 1982.



Slika 15. Rezultati proračuna treće simulacije.

a) Rezultat proračuna treće simulacije za podsliv I-I, b) Rezultat proračuna treće simulacije za podsliv I-I do II-II, c) Rezultat proračuna treće simulacije za podsliv II-II do III-III, d) Rezultat proračuna treće simulacije za podsliv V-IV; Osječka ulica, e) Rezultat proračuna treće simulacije za zaključni profil (Program HEC-HMS)

Tablica 8. Numerički prikaz rezultata za kišu 1982. [1]

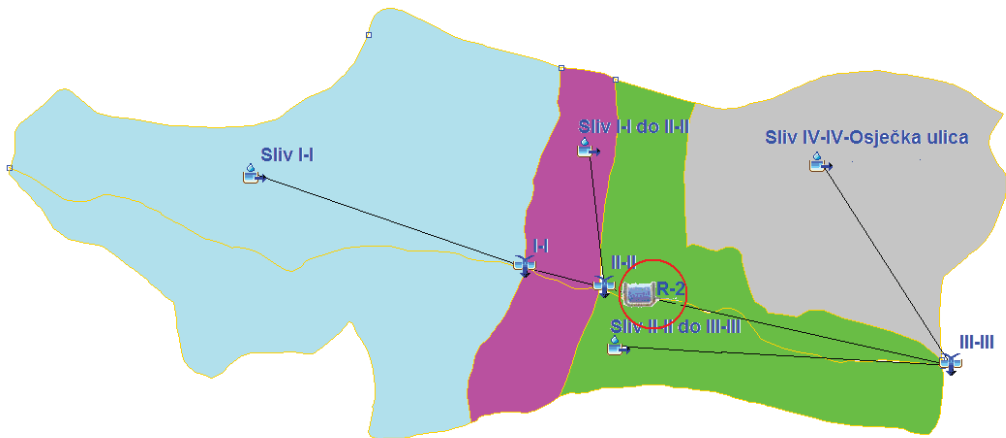
Project: Skurinjev2 Simulation Run: Run 2

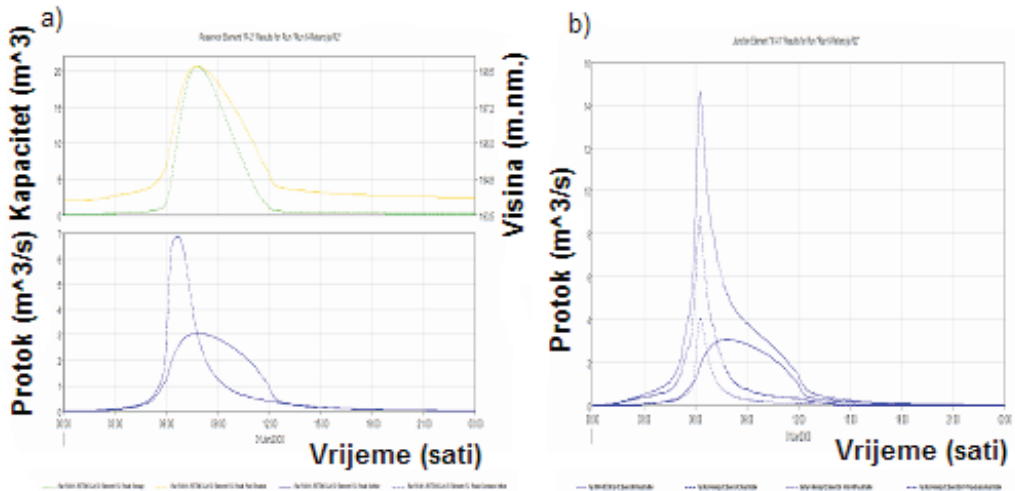
Start of Run: 25stu1982, 00:00 Basin Model: Basin 1
 End of Run: 27stu1982, 00:00 Meteorologic Model: 25.11.1982
 Compute Time: 04vei2007, 17:11:12 Control Specifications: 1982

Volume Units: MM

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
I-I	1,386	0,6	26stu1982, 06:00	14,93
II-II	1,636	0,7	26stu1982, 06:00	14,94
III-III	2,884	2,5	26stu1982, 05:00	22,49
Sliv I-I	1,386	0,6	26stu1982, 06:00	14,93
Sliv I-I do II-II	0,250	0,1	26stu1982, 05:00	14,99
Sliv II-II do III-III	0,558	0,4	26stu1982, 05:00	15,81
Sliv IV-IV-Osječka ulica	0,690	1,5	26stu1982, 05:00	45,79

Posljednja simulacija (četvrta) izrađena je za slučaj kada na stacionaži 3+975,3 imamo retenciju. Na slici 16 dan je prikaz sliva sa retencijom (oznaka R2). Na slici 17 dan je prikaz rezultata same retencije dok je na slici 17 dan prikaz rezultata za zaključni profil (ulaz u zatvorenu dionicu). Za ovu se simulaciju koristila sintetička kiša.

**Slika 16. Prikaz sliva sa retencijom (R2) [1]**



Slika 17. Rezultati proračuna sa retencijom.

a) Rezultat proračuna retencije, b) Rezultat proračuna simulacije s retencijom za zaključni profil [1]

Usporedba rezultata dobivenih ovom simulacijom i rezultata dobivenih u Idejnom projektu uređenja Škurinjskog potoka kada na istoj lokaciji imamo retenciju gotovo je identična onima dobivenim za slučaj prve simulacije (tablica 6 i slika 12).

6. Zaključak

Cilj ovoga rada u prvom je redu bio prikazati proces modeliranja sliva pomoću programa HEC-HMS. Opisan je postupak kreiranja modela sliva te su navedene osnove korištenja ovog programa. Ovaj program posjeduje mnoštvo opcija te mnoge mogućnosti primjene. U ovom radu prikazan je jedan mali dio tih mogućnosti, koji je dovoljan za izradu osnovnog modela sliva Škurinjskog potoka. Modelirano je prirodno stanje sliva Škurinjskog potoka, te su prikazani rezultati proračuna za takvo stanje sliva. Izvršena je i simulacija za sliv sa eventualno izgrađenom retencijom na ulazu u zatvoreni dio sliva, a rezultati su dijelom uspoređeni sa ranije provedenim i dokumentiranim proračunima po drugim metodologijama, a za identične profile.

Rad može poslužiti korisniku programa HEC-HMS da se upozna sa načinom izrade modela sliva. Također treba upozoriti korisnika da proces modeliranja zahtijeva veliko iskustvo i teoretsko znanje kada je u pitanju interpretacija rezultata. Ovaj program može se povezati sa ostalim programima razvijenim od strane U.S. Army Corps of Engineers kao što je HEC-RAS. Također je moguće i

povezivanje sa ArcGIS-om. Velika prednost ovog programa je i njegova licenca koja dozvoljava slobodno korištenje bez novčane naknade. To ga čini posebno pogodnim za primjenu u obrazovnom sustavu. Nadam se da će ovaj rad potaknuti čitatelja da krene u istraživanje novih tehnologija na području modeliranja hidroloških sustava.

Literatura

- [1] Internet adresa: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- [2] Ožanić. N i suradnici: Idejni projekt uređenja Škurinjskog potoka uzvodno od stacionaže 2+760,00 (lokacije rasadnika „Parkovi“ d.o.o. Rijeka), Građevinski fakultet Rijeka, 2002.
- [3] Marin Mijalić: Diplomski rad: Određivanje hidrograma otjecanja korištenjem programa HEC-HMS, Građevinski fakultet Rijeka, 2007.
- [4] U.S. Army Corps of Engineers: Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual, 2000.
- [5] U.S. Army Corps of Engineers: Hydrologic Modeling System HEC-HMS Users Manual, 2006.
- [6] U.S. Army Corps of Engineers: Introduction and Application of Kinematic Wave Routing Techniques Using HEC-1, 1993.

Vodoopskrbni sustav Rijeka – vodoopskrbni podsustav Krk

Rijeka Water Supply System – Water Supply Subsystem Krk

Ivica Plišić

Sažetak. U radu se navodi postojeće stanje vodoopskrbe Primorsko-goranske županije sa posebnim osvrtom na vodoopskrbni sustav Rijeka i vodoopskrbni sustav otoka Krka. Da bi se sagledala problematika vodoopskrbe otoka Krka potrebno je promotriti stanje i razvoj vodoopskrbe šire regije, a to je riječka regija čiji sastavni dio treba postati i vodoopskrba Krka.

Na osnovu broja potrošača i opskrbnih normi za pojedine potrošače proračunate su potrebne količine vode. Na osnovu potrebnih količina vode i raspoloživih količina izvršena je analiza potrebnog razvoja vodoopskrbnog sustava otoka Krka i podsustava Rijeka.

Na otoku Krku ima vlastitih izvora vode. Svi ti izvori vode se danas koriste u vodoopskrbi. Njihovi kapaciteti se mogu povećavati, ali su ukupne količine limitirane. Zbog toga je neophodno dovesti vodu sa kopna.

Ključne riječi: vodoopskrba, izvori vode, planovi razvoja, otok Krk

Abstract. The paper says the current situation of water supply Primorje - Gorski Kotar County with special review to Rijeka water supply system and water supply system of the island of Krk. To a deeper look at problems of water supply the island of Krk, it is necessary to consider the situation of water supply and development of the wider region, and that is the Rijeka region which should be an integral part of becoming and water supply from above

Based on the number of consumers, and standards of care for individual consumers to the budget required amounts of water. On the basis of the required amount of water available and the amount of performed analysis required the development of water supply system and the island of Krk Rijeka subsystems.

On the island of Krk has their own sources of water. All these sources of water are now used in water supply. Their capacity can be increased, but the total amount is limited. Therefore, it is necessary to bring water from the mainland.

Keywords: water supply, water resources, development plans, the island of Krk

1. Uvod

Za potrebe izrade Prostornog plana Primorsko-goranske županije izrađen je Vodoopskrbni plan. U vodoopskrbnom planu Primorsko-goranske županije analizirano je postojeće stanje vodoopskrbe, postojeći izvori vode i mogući budući zahvati vode, te je izvršena analiza potreba za vodom u planskom razdoblju do 2015. god. Vodoopskrbnim planom se planira razvoj vodoopskrbe u tri podsustava i to vodoopskrbni podsustavi Rijeka, Žrnovnica i Lokve. U ovom radu daje se osvrt na potrebe za vodom u podsustavu Rijeka s posebnim osvrtom na vodoopskrbu otoka Krka.

Primorsko-goranska županija je dio vodnog područja primorsko – istarskih slivova. U vodoopskrbne sustave su uključena 82 izvorišta različite minimalne izdašnosti (od 0 do 1.500 l/s), a ukupna mogućnost zahvaćanja se kreće od 3.165 l/s do 6.777 l/s vode. Premda je prosječna opskrbljenost stanovništva vodom za piće iz javnih sustava oko 93%, a gospodarstva 100%, stanje vodoopskrbe ne možemo smatrati potpuno zadovoljavajućim. Vodoopskrbni sustav Rijeke je najvećeg kapaciteta u županiji i podmiruje više od 70 % njene potrošnje. Povezan je sa sustavom Opatije i manjim dijelom Crikvenice (Novog Vinodolskog) te u novije vrijeme i sa sustavom otoka Krka.

Vodoopskrbni sustav Rijeka obuhvaća Grad Rijeku i sve općine na području bivše općine Rijeka (Grad Rijeka, Kastav, Bakar i Općine Klana, Viškovo, Jelenje, Čavle, Kostrena, Kraljevica). U ovom sustavu je vodoopskrbom obuhvaćeno cijelo područje, tj. 99% stanovništva. Zahvaćene količine vode iznose 2200 l/s, što je više nego dovoljno za današnju potrošnju.

Vodoopskrbni sustav otoka Krka pokriva područje bivše općine Krk, tj. područje sadašnjeg Grada Krka i Općina Omišalj, Malinska, Punat, Vrbnik, Dobrinj i Baška. Najmanji postotak stanovnika opskrbljen vodom u Županiji primorsko-goranskoj bilježi sustav Krka (68%). Tako cijela područja otoka Krka nisu pokrivena vodoopskrbom (Dobrinjština, Šotovento), ali je izgradnja sustava u toku. Ukupna količina vode zahvaćena na otoku ne pokriva potrebe niti za sada priključenih potrošača.

U krčkom se sustavu koristi više različitih izvorišta. Danas se koriste Ponikve (85 l/s), Jezero (0-40l/s), Bašćanska dolina (25 l/s), Vrbničko polje (0.2-3 l/s) i Dobrinj (0.2-2 l/s). Krk već danas nema dovoljnih količina vode pa se koristi dovod s kopna, odnosno voda iz akumulacije Tribalj (40 + 40 l/s). Izvori ukupno daju cca. 195 l/s, kolika je i današnja potrošnja. Dodatne se potrebne količine za kratkoročni razvoj mogu osigurati na izvorištima na otoku i to povećanjem zahvata vode na izvorištima Ponikve (250-500 l/s), Jezero (80 l/s), Bašćanska kotlina (85 l/s) te kopno (125 l/s).

Prema podacima iz Prostornog plana se procjenjuje da će u Županiji 2015. god. prosječno godišnje biti zaposleno 130.902 radnika. Od tog će broja 15.911 biti prosječno godišnje zaposleno u turizmu i ugostiteljstvu i to stalno zaposlenih 11.933, te sezonski zaposlenih prosječno na 4 mjeseca je još 11.933. Na otoku Krku od toga broja će prosječno godišnje biti zaposleno 6.556 radnika u proizvodnoj i poslovnoj djelatnosti i 5.616 u ugostiteljsko turističkoj djelatnosti.

Broj turista na području Primorsko-goranske županije je definiran Prostornim planom za 2015.god. na 200.000 turista u maksimalnom danu, od toga na otoku Krku 45.433 turista. Pretpostavljeni broj turista u kućama i stanovima za odmor u kolovozu mjesecu 2015.god. bio bi za Županiju 43.367, a za otok Krk 15.203.

Na osnovu broja potrošača i opskrbnih normi za pojedine potrošače proračunate su potrebne količine vode. Na osnovu potrebnih količina vode i raspoloživih količina izvršena je analiza potrebnog razvoja vodoopskrbnog sustava otoka Krka i podsustava Rijeka.

Ustanovljeno je da na otoku Krku nema dovoljnih količina vode. Zbog toga se predviđa povećanje zahvata vode na samom otoku te dovod vode sa kopna iz vodoopskrbnog sustava Rijeka.

2. Postojeće stanje vodoopskrbe u Primorsko-goranskoj županiji

Primorsko-goranska županija je dio vodnog područja primorsko-istarskih slivova. Zauzima površinu od 3.588 km². Javnu vodoopskrbu obavlja devet komunalnih društava sa sjedištima u Rijeci, Opatiji, Novom Vinodolskom, Delnicama, Čabru, Vrbovskom, Krku, Cresu i Rabu.

U vodoopskrbne sustave su uključena 82 izvorišta različite minimalne izdašnosti (od 0 do 1.500 l/s), a ukupna mogućnost zahvaćanja se kreće od 3.165 l/s do 6.777 l/s vode, što ovisi o hidrološkim prilikama. Godišnje se na izvorištima zahvaća više od 50 mil. m³ vode. Potrošačima se isporuči oko 33 mil. m³, od čega gotovo polovica domaćinstvima. Prema zbirnim podacima za županiju, srednji računski gubitak iznosi 37%, iako u nekim sustavima prelazi i 60%. Na temelju istih prosječnih podataka dnevna potrošnja po stanovniku je približno 146 l [1].

Premda je prosječna opskrbljenost stanovništva vodom za piće iz javnih sustava oko 93%, a gospodarstva 100%, stanje vodoopskrbe ne možemo smatrati potpuno zadovoljavajućim [1]. Raspoloživa izvorišta nisu ravnomjerno rasprostranjena u odnosu na područja potrošnje, a nedovoljna povezanost sustava i veliki gubici u mreži su zapreka sigurnoj i kvalitetnoj vodoopskrbi. U nekim sustavima (Delnice, Čabar, Opatija, Krk) potrebe za vodom u ljetnim mjesecima nadmašuju raspoložive zalihe, a sve veći problem postaje i osiguranje propisane kakvoće vode. Posebno je teško na područjima gdje nema izgrađenog sustava.

Vodoopskrbni sustav Rijeke je najvećeg kapaciteta u županiji i podmiruje više od 70 % njene potrošnje. Povezan je sa sustavom Opatije i manjim dijelom Crikvenice (Novog Vinodolskog) te u novije vrijeme i sa sustavom otoka Krka. Kontinuirano se vrše vodoistražni radovi radi zaštite kaptiranih izvora i povećanja njihove izdašnosti. Najznačajniji su oni u zaleđu izvora Rječine s namjerom nalaženja optimalnog rješenja zahvata ovih voda koje su strateški resurs vodoopskrbe planiranog vodoopskrbnog sustava Kvarnera (Rijeka, Opatija, Crikvenica i Krk) [1].

Na širem području Opatije, sustav je vrlo složen, s velikim brojem crpnih stanica i prekidnih komora na relativno malenom prostoru. Zbog manjka vode tijekom cijele godine se potrebne količine osiguravaju dijelom iz riječkog vodovoda.

Za vodoopskrbu crikveničko–vinodolskog područja se koristi izvor Žrnovnica. Izgradnjom injekcijske zavjese je spriječen zaslanjujući utjecaj mora, a dodatnim tehničkim zahvatima bi se mogle zahvatiti i veće količine vode. Ovaj sustav ima najveće tehničke gubitke na području županije.

Cres i Lošinj koriste isključivo vlastito izvorište – Vransko jezero, vrlo dobre kvalitete i s danas dovoljno raspoložive količine. Ipak, u slučaju akcidentne situacije – iznenadnog onečišćenja jezera ili značajnijeg povećanja potreba za vodom, nije osiguran alternativni izbor vodoopskrbe jer su prema rezultatima novih istražnih radova godišnje raspoložive količine ograničene.

Na otoku Krku, osim vlastitih resursa pretežno površinskih voda, u ljetnim se mjesecima koriste dodatne količine vode s kopna, iz vodovoda tehnološke

vode INA rafinerije Urinj te u novije vrijeme i iz vodoopskrbnog sustava Rijeka. Rezultati istražnih radova ukazuju da postoji mogućnost zahvata većih količina na samom otoku. Opskrbljenost stanovništva je najniža u županiji.

Vodoopskrba otoka Raba se bazira na dovedu vode s kopna, a manje se količine, pretežno u zimskom razdoblju, koriste iz vlastitih vodozahvata. Konačno rješenje vodoopskrbe će se ostvariti izgradnjom paralelnog podmorskog cjevovoda kopno – Rab.

Na području Čabra postoji nekoliko parcijalnih sustava čiji su glavni problemi količina i kvaliteta vode zahvaćenih izvora, osobito u ljetnim mjesecima, a slično je i na širem području Delnice. Izgradnja centralnog vodoopskrbnog sustava Čabra (CVS) se realizira prema integralnoj studiji, a u tijeku je i izgradnja magistralnog cjevovoda budućeg regionalnog vodova Gorskog kotara čiji se zahvat planira u slivu Križ potoka (sliv Kupe), a postojeći zahvati bi se koristili za industrijske potrebe, odnosno kao rezervni kapacitet.

Sastav Vrbovsko raspolaže dovoljnim količinama vode, a kvaliteta vodoopskrbe će se postići dovršetkom izgradnje sustava Ribnjak te u budućnosti povezivanjem s regionalnim vodovodom Gorskog kotara.

2.1. Opće karakteristike postojećih sustava vodoopskrbe rijeke i krka

2.1.1. Vodoopskrbni sustav Rijeka

Vodoopskrbni sustav Rijeka obuhvaća Grad Rijeku i sve općine na području bivše općine Rijeka (Grad Rijeka, Kastav, Bakar i Općine Klana, Viškovo, Jelenje, Čavle, Kostrena, Kraljevica). U ovom sustavu je vodoopskrbom obuhvaćeno cijelo područje, tj. 99% stanovništva. Zahvaćene količine vode iznose 2200 l/s, što je više nego dovoljno za današnju potrošnju. Dio privrede na obalnom potezu od Mlake prema Kantridi ima vlastite izvore tehnološke vode u ukupnoj količini od 5.136.000 m³/god [1].

U riječkom sustavu se koriste izvori Zvir I (1200 l/s), Zvir II (450 l/s), Martinšćica (300-410 l/s), Bakarski izvori (250-350 l/s) te izvor Rječine (0-1800 l/s), što u minimumu daje 2.200 l/s [1]. S obzirom na postojeće potrebe od 1697 l/s, u ovom razdoblju ima dovoljno količina vode za kratkoročni razvoj i za susjedna područja (Opatija i Crikvenica) [1].

Vode su prema Pravilniku o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće (NN 46/94) u ovom sustavu vrlo kvalitetne. Ovom svakako doprinose i zone zaštitne izvorišta koje su propisane odlukom (Odluka o sanitarnoj zaštiti vode za piće na riječkom području Sl. nov. 6/94). Ove zaštitne zone posebno štite izvor Rječine (vodoopskrbni rezervat) i sadašnje izvore vode Zvir, Martinšćica, Perilo, Dobra i Dobrica. Na prostoru vodoopskrbnog rezervata i Ia zaštitne zone je potpuno

zabranjena gradnja. U Ib, II i III zaštitnoj zoni u kojoj se nalazi npr. Grobničko polje je gradnja ograničena. Na zapadnom dijelu prema općini Opatija i Matulji te istočno u općini Kostrena koje spadaju u zonu bez ograničenja se omogućuje gradnja svih vrsta objekata i pogona.

Riječki sustav je sustav koji koristi izvore na razini mora, te izvor Rječine koji je na koti 355 m n.m. ali presušuje. Zbog toga u ovom sustavu imamo veliku visinu dizanja vode do potrošača (500 m) s velikim brojem crpnih postaja i utroškom električne energije. Visina dizanja vode do potrošača se smanjuje korištenjem izvora Rječine (u periodu kada ne presuši), tako da svi potrošači ispod kote glavne vodospreme „Streljana“ (kota 325 m n.m.) vodu dobivaju gravitacijski, a za ostale se koristi smanjeno dizanje vode.

Ovo se u periodu kad se koristi izvor Rječine (u periodu kad ne presuši), koji je na koti 325 m n.m, izbjegava upravljanjem.

Područje oko Klane dobiva vodu iz Slovenije (Ilirska Bistrica) pa ga je također prijeko potrebno spojiti na riječki sustav.

Sustav dobro funkcionira i u dobrom je stanju. Postepeno se uvodi daljinski nadzor i upravljanje nad svim bitnim točkama. Temelj tog sustava je postavljen i on funkcionira. Glavni dovodni cjevovodi i glavne vodospreme su izgrađeni u posljednjih 30 godina.

2.1.2. Vodoopskrbni sustav otoka Krka

Vodoopskrbni sustav otoka Krka svrstavamo u područje Županijskog priobalja zbog toga što je sustav već sada dugoročno vezan na jedinstveni sustav vodoopskrbe Rijeke.

Ovaj vodoopskrbni sustav pokriva područje bivše općine Krk, tj. područje sadašnjeg Grada Krka i Općina Omišalj, Malinska, Punat, Vrbnik, Dobrinj i Baška. Najmanji postotak stanovnika opskrbljen vodom u Županiji primorsko-goranskoj bilježi sustav Krka (68%). Tako cijela područja otoka Krka nisu pokrivena vodoopskrbom (Dobrinjština, Šotovento), ali je izgradnja sustava u toku. Ukupna količina vode zahvaćena na otoku ne pokriva potrebe niti za sada priključenih potrošača [1].



Slika 1. Jezero kod Njivica

Postojeća industrija na otoku uzima vodu iz vodoopskrbnog sustava u onim mjestima u kojima vodoopskrba postoji. Veći industrijski pogon na sjeveru otoka kao što je INA - petrokemijska industrija Omišalj koristi za tehnološke potrebe, vode iz akumulacije Tribalj izgrađenim vodovodom koji tvornici osigurava 200 l/s. Danas se iz ovog sustava koristi do 100 l/s. Planira se da će ovaj pogon za tehnološke potrebe koristiti vode Jezera kod Njivica [1].

U krčkom se sustavu koristi više različitih izvorišta. Danas se koriste Jezero (0-40 l/s) /sl. 1./, Ponikve (85 l/s) /sl. 2./, Bašćanska dolina (25 l/s) /sl. 3./, Vrbničko polje (0.2-3 l/s) i Dobrinj (0.2-2 l/s). Krk već danas nema dovoljnih količina vode pa se koristi dovod s kopna, odnosno voda iz akumulacije Tribalj (40 + 40 l/s) [2]. Izvori ukupno daju cca. 195 l/s, kolika je i današnja potrošnja. Dodatne se potrebne količine za kratkoročni razvoj mogu osigurati na izvorištima na otoku i to povećanjem zahvata vode na izvorištima Ponikve (250-500 l/s), Jezero (80 l/s), Bašćanska kotlina (85 l/s) te kopno (125 l/s). Ovo daje ukupne mogućnosti od 530 - 780 l/s. Za osiguranje ovih količina treba izvršiti zahvat vode na izvorištima, povećanje postojeće akumulacije u Ponikvi na 9.000.000 m³, nove bunare u Bašćanskoj kotlini i slivu Jezero te dovesti vodu sa kopna. Pored toga, za ove je dodatne količine vode potrebno rekonstruirati i dograditi postojeću vodoopskrbnu mrežu [1].



Slika 2. Jezero Ponikve

Voda koja se koristi u ovom sustavu je različitog porijekla pa tako varira i u kvaliteti. Najkvalitetnija je voda iz dubljeg podzemlja zahvaćena u Bašćanskoj kotlini (izvrсна voda). Nešto lošije kvalitete je voda iz izvorišta Ponikve gdje se uglavnom koristi podzemna voda ili iz kaptiranih površinskih izvora, ali se može miješati s površinskom vodom iz formirane akumulacije te se mora kondicionirati. Voda najlošije kvalitete je iz izvorišta Jezero. Ta se voda kondicionira na uređaju i takva se koristi u vodoopskrbi. Na isti se uređaj dovodi i voda s kopna, iz akumulacije Tribalj, a danas se zamjenjuje vodom iz vodoopskrbnog sustava Rijeka.

Sva izvorišta imaju definirane zone zaštite. Ove zone sanitarne zaštite, koje ograničavaju antropogene utjecaje i aktivnosti na pojedinim područjima.

Sustavu uglavnom nedostaju količine vode što se u prvom redu odnosi na izvorište Ponikve, a uz to je prisutna i slaba (Ponikve i Jezero) ili nikakva (Bašćanska kotlina) povezanost sustava.

Mogućnosti kratkoročnog i dugoročnog poboljšanja su definirane. Kratkoročno to je bolje povezivanje izvorišta Jezero i Ponikve, izgradnja nove crpne postaje Ponikve sa izgradnjom uređaja za kondicioniranje vode (izvedeno), rekonstrukcija i dogradnja uređaja za kondicioniranje vode u izvorištu Jezero te gradnja dodatnog bunara u Bašćanskoj kotlini (izvedeno). Za dovod vode u sva područja otoka treba izgraditi dovodne cjevovode, čije je projektiranje i izgradnja započeta [1].



Slika 3. Bušeni bunar EB-2 Baška

Dugoročno, poboljšanje vodoopskrbe se može riješiti povezivanjem sa riječkim vodoopskrbnim sustavom. Dovodni cjevovod je izgrađen prošle godine, a slijedi dogradnja sustava kako bi se voda iz riječkog područja mogla distribuirati po otoku Krku. U isto vrijeme dograđuje se sustav dovoda vode iz Jezera kod Njivica do sjevera otoka s priključkom na postojeće industrijske kapacitete kako bi se jezerska voda lošije kvalitete koristila za industrijske potrebe. Dovođenjem vode iz riječkog vodoopskrbnog sustava prestati će potreba za korištenje tehnoloških voda iz jezera Tribalj za vodoopskrbne potrebe na otoku Krku.

Upravljanje sustavom je organizirano preko daljinskog nadzora i upravljanja. Ovaj sustav postepeno treba proširivati na sve bitne točke u vodoopskrbnom sustavu.

Postojeći sustav nije star. Značajnijim razvitkom turizma na otoku se prišlo rekonstrukciji postojećih sustava, tako da su glavni cjevovodi mlađi od 30 godina.

3. Analiza utjecajnih veličina

3.1. Značajke područja županije i susjednih kontaktnih zona

Područje Primorsko-goranske županije se generalno može razmatrati uz slijedeća obilježja:

- Izvorišta, njihov položaj u prostoru i količine vode, s gledišta njihovog optimalnog uključivanja u vodoopskrbu kako bi se podmirile potrebe za vodom po planskim razdobljima;
- Raspored i koncentracija naselja po prostoru, odnosno broj i vrsta korisnika te količine vode potrebne po pojedinim razdobljima;
- Prirodna obilježja i povijesno-kulturne značajke pojedinih lokaliteta s ciljem osiguranja potrebnih uvjeta za razvoj, u ovom slučaju voda;
- Topografske prilike područja u odnosu na vođenje trase i formiranje vodoopskrbnih sustava i podsustava s visinskim zonama;
- Postojeće stanje izgrađenosti vodovoda te organizacijski model upravljanja.

Svako od navedenih obilježja zahtijeva detaljnije analize, a predstavlja se utjecajem na odabir tehničkog rješenja [1].

Postojeći vodoopskrbni sustavi su se razvijali ovisno o mogućnostima lokalnih izvora, a tek se iznimno voda distribuira u susjedna područja.

Područje Županije obiluje vodom, ali izvori nisu ravnomjerno raspoređeni. Najveće se količine vode nalaze uz obalu. Izvori u planinskom dijelu su manje izdašnosti, a na otocima je prisutan nedostatak vode (osim na Cresu).

U susjednim područjima je situacija drugačija. U Ličko-senjskoj županiji ima obilje vode od čega su značajne količine pitkih voda. U Istarskoj županiji su na raspolaganju manje količine vode u odnosu na potrebe. Posebno je prisutan nedostatak pitke vode u ljetnom razdoblju. Takva situacija je riješena izgradnjom akumulacije i uređaja za kondicioniranje vode.

3.2. Potrošači, raspored po prostoru

Potrošnja vode na kraju planskog razdoblja 2015. god. je određena na osnovu projekcije broja stanovništva i gospodarske aktivnosti te predviđenih opskrbnih normi. Projekcija broja stanovništva je definirana u Prostornom planu Županije primorsko-goranske. Gospodarska aktivnost je definirana predviđenim površinama namijenjenim gospodarskoj i ugostiteljsko-turističkoj aktivnosti. Vodoopskrbnim planom su definirane opskrbe norme.

Prema podacima iz Prostornog plana se procjenjuje da će u Županiji 2015. god. prosječno godišnje biti zaposleno 130.902 radnika. Od tog će broja 15.911 biti prosječno godišnje zaposleno u turizmu i ugostiteljstvu [4]. Na osnovu ovog podatka i podataka o površinama predviđenim za pojedine djelatnosti (proizvodna, poslovna i ugostiteljsko-turistička), prema Prostornom planu te na osnovu broja sad zaposlenih radnika, izrađena je prognoza broja radnika po pojedinim Općinama i Gradovima.

Broj radnika u proizvodnim i poslovnim djelatnostima 2015.god. je 114.991, a ovaj broj je dobiven odbijanjem radnika zaposlenih u turizmu i ugostiteljstvu od ukupnog broja radnika.

Broj radnika u ugostiteljstvu i turizmu se ljeti udvostručuje. Uzme li se u proračun da sezonski radnici rade 4 mjeseca, a stalno zaposleni cijelu godinu te da se s obzirom na prosječan broj zaposlenih od 15.911 radnika dobiva da je stalno zaposlenih 11.933, sezonski zaposlenih prosječno na 4 mjeseca je još 11.933. To u sezoni daje ukupan broj zaposlenih u turizmu i ugostiteljstvu od 23.869. Ovaj broj zaposlenih je raspoređen po Općinama i Gradovima kako je prije navedeno.

Tablica 1. Broj zaposlenih u gospodarstvu po pojedinim Općinama i Gradovima na otoku Krku [1]

Red. br.	OPĆINE I GRADOVI	GOSPODARSKA NAMJENA						
		PROIZVODNA I POSLOVNA				UGOSTITELJSKO – TURISTIČKA		
		ha	Broj radnika			ha	Broj radnika	
1999.g.	2015.g.		%	1999.g.	2015.g.			
17	Krk	30	1.367	1.750	28,02	130	189	948
18	Baška	10	70	339	384,29	100	138	729
19	Dobrinj	10	112	339	202,68	60	14	438
20	Malinska	10	174	339	94,83	100	184	729
21	Omišalj	225	965	3.000	210,88	190	182	1.386
22	Punat	10	286	450	57,34	150	120	1.094
23	Vrbnik	10	123	339	175,61	40	4	292
OTOK KRK		305	3.097	6.556	111,69	770	831	5.616
UKUPNO ŽUPANIJA:		2.645	67.375	114.989		2.955	5.486	23.869

Broj turista na području Primorsko-goranske županije je definiran Prostornim planom na 200.000 turista u maksimalnom danu. Broj turista po područjima Općina i Gradova je dobiven prema površinama namijenjenim za tu djelatnost, ali s različitim opterećenjem broja turista po hektaru. To znači da je predviđeno

da gustoća izgrađenosti nije svugdje ista. U slučaju da se ovakva korekcija ne primijeni u pojedinim turističkim područjima, u planskoj 2015. god. bi bilo manje turista nego danas.

Tablica 2. Broj turista po pojedinim kategorijama smještaja u 2015. god. po Gradovima i Općinama na otoku Krku [1]

Red. br.	OPĆINE I GRADOVI	HOTELI	KAMP	KUĆANST.	UKUPNO
17	Krk	1.918	2.685	3.068	7.671
18	Baška	1.475	2.065	2.360	5.900
19	Dobrinj	885	1.239	1.416	3.540
20	Malinska	1.475	2.065	2.360	5.900
21	Omišalj	2.803	3.924	4.484	11.211
22	Punat	2.213	3.098	3.540	8.851
23	Vrbnik	590	826	944	2.360
OTOK KRK		11.359	15.902	18.172	45.433
UKUPNO ŽUPANIJA:		69.848	51.342	78.545	200.000

Raspored turista po pojedinim vrstama turističkih kapaciteta je bitan faktor za dobivanje ukupnih potrebnih količina na nekom području. Raspodjela ukupnog broja turista je vršena ovisno o ukupnom broju turista na nekom području i postojećim kapacitetima.

Stanari stanova i stambenih objekata u turističkim područjima koji tamo povremeno borave, potrošnjom vode dodatno opterećuju vodoopskrbne sustave. Zbog toga treba i te potrošače uključiti u vršnoj ljetnoj potrošnji. Broj tih potrošača je teško točno utvrditi. Kao polazni podaci su korišteni podaci Ureda za statistiku o broju prijavljenih turista i noćenja u kućama i stanovima za odmor. U tom je razdoblju (15.06.-15.09.99.) zabilježeno 823.090 noćenja. Za mjesec vršne potrošnje se može pretpostaviti da je broj potrošača bio dvostruko veći od prosjeka za ova tri mjeseca, tj. 548.726.

Za plansko razdoblje i završnu godinu se pretpostavlja da je porast broja ovih noćenja proporcionalan pretpostavljenom porastu broja noćenja turista. god. 1999. je u kolovozu mjesecu zabilježeno 2.530.537 turističkih noćenja, a 2015.god. se planira ostvarenje dnevnog prosjeka od 200.000 turista ili za kolovoz mjesec 6.200.000 noćenja. To je povećanje od 2.45 puta. Za toliko je, dakle, planiran i porast broja noćenja vikendaša. Za proračun potrošnje vode se uzima prosječan broj turista u jednom danu, što se dobije iz ostvarenog broja noćenja podijeljenog s brojem dana u tom mjesecu.

Ukupan broj prijavljenih turista u kućama i stanovima za odmor u 1999.god. je bio 50.412. Ukupan ostvaren broj noćenja je 823.090. Ovaj broj noćenja, uvećan 2,45 puta, daje pretpostavljeni broj noćenja turista u kućama i stanovima za odmor u 2015.god. od 2016571. Prema prethodnoj pretpostavci da je broj potrošača dvostruko veći od prosjeka, za mjesec vršne potrošnje u 1999.god. imamo 548.726 noćenja ili uvećano za 2,45, u 2015.god. 1.344.379 noćenja. Znači, prosječno dnevno u kućama i stanovima za odmor u 2015.god. imamo 43.367 turista [1].

Raspored ovako dobivenog broja turista, noćenja i broja turista u jednom danu je izvršen prema površinama predviđenim za ugostiteljsko-turističku djelatnost te prema broju registriranih turista u 1999.god. (tablica 3)

Tablica 3. Pretpostavljeni broj turista u kućama i stanovima za odmor u kolovozu mjesecu 2015.god. po Gradovima i Općinama na otoku Krku [1]

Red. br.	OPĆINE I GRADOVI	BROJ TURISTA U JEDNOM DANU	ha	BROJ TURISTA U JEDNOM DANU
		1999. god.	2015. god.	2015. god.
17	Krk	1.010	130	2.021
18	Baška	1.362	100	2.725
19	Dobrinj	406	60	745
20	Malinska	2.023	100	4.046
21	Omišalj	1.653	190	3.306
22	Punat	349	150	1.863
23	Vrbnik	48	40	497
OTOK KRK		6.851	770	15.203
UKUPNO ŽUPANIJA:		10.998	2.955	43.367

Prostornim planom Županije je određen broj marina i broj vezova u njima. Po pojedinim područjima planirani broj vezova je naveden u slijedećoj tablici. (tablica 4)

Tablica 4. *Pretpostavljeni broj turista marina i vezova u njima za 2015. god. po Gradovima i Općinama na otoku Krku [1]*

Red. br.	OPĆINE I GRADOVI	BROJ KOMERCIJALNIH VEZOVA	
		postojeće	novo
17	Krk		330
18	Baška		
19	Dobrinj		
20	Malinska		
21	Omišalj		
22	Punat	1.050	
23	Vrbnik		
OTOK KRK		1.050	330
UKUPNO ŽUPANIJA:		2.086	2.880

3.3. Analiza jedinične potrošnje po fazama razvoja

Prema podacima o analiziranim normama potrošnje, usvojene su norme potrošnje za plansko razdoblje kako je to navedeno u slijedećoj tablici (tablica br.5.). Ove opskrbe norme su za maksimalnu mjesečnu potrošnju. Njih treba po potrebi korigirati na maksimalnu dnevnu potrošnju koeficijentom 1,2. Norme su izrađene analizom današnje potrošnje na otoku Krku te trendovima promjene potrošnje (smanjenje potrošnje) proizašle iz mjerenja i obrađene u literaturi [3].

Tablica 5. *Opskrbne norme pojedinih vrsta potrošača za plansko razdoblje do 2015. god. po Gradovima i Općinama na otoku Krku [1]*

R. br.	Vodoopskrbni sustav	POTROŠAČI					
		Stanov.	Vikendaši	Radnici	Turisti		
					Hoteli	Kamp	Kućan.
4.	KRK	250	250	60	450	150	250

4. Potrebne količine vode

Na osnovu broja potrošača, njihovog rasporeda u prostoru, koeficijenta promjene potrošnje vode tokom godine i jedinične potrošnje određuju se potrebne količine vode. Ovaj proračun za područje otoka Krka dan je tablično i razrađen je kroz tablice od br. 6 do 9.

U tablici br. 6. dani su potrošači po Gradovima i Općinama dobiveni na osnovu razmatranja u prethodnim poglavljima.

Tablica 6. Količine vode za plansko razdoblje do 2015.god. - potrošači po Gradovima i Općinama na otoku Krku [1]

OPĆINE I GRADOVI	POTROŠAČI				
	Stanov.	Vikendaši	Poslov.	Turizam	Proizv.
			Broj radnika	Broj radnika	Površ.
Krk	6.561	2.021	1.400	957	30
Baška	1.581	2.725	271	736	10
Dobrinj	2.012	745	271	442	10
Malinska	3.335	4.046	271	736	10
Omišalj	3.700	3.306	6.088	1.399	225
Punat	2.360	1.863	450	1.104	10
Vrbnik	1.350	497	271	294	10
UKUPNO ŽUPANIJA:	353.610	43.367	114.993	23.866	2.645

Tablica 7. Količine vode za plansko razdoblje do 2015.god. - potrošači po Gradovima i Općinama na otoku Krku [1]

OPĆINE I GRADOVI	POTROŠAČI			
	Broj turista 2015.			
	Hoteli	Kamp	Kućan.	Vezovi
Krk	1.929	2.700	3.086	330
Baška	1.484	2.077	2.374	
Dobrinj	890	1.246	1.424	
Malinska	1.484	2.077	2.374	
Omišalj	2.819	3.947	4.511	
Punat	2.226	3.116	3.561	1.050
Vrbnik	594	831	950	
UKUPNO ŽUPANIJA:	70.675	50.675	78.653	4.966

U tablici br. 8. proračunate su prosječne količine vode koje se troše u jednom danu po pojedinim kategorijama potrošača i po pojedinim Gradovima i Općinama.

Tablica 8. Količine vode za plansko razdoblje do 2015.god. – prosječne količine vode po Gradovima i Općinama na otoku Krku [1]

OPĆINE I GRADOVI	PROSJEČNE KOLIČINE VODE									
	Stanovništvo		Vikendaši		Radnici		Radnici		Inustrija	
	l/st/d	m ³ /d	l/v/d	m ³ /d	l/r/d	m ³ /d	l/r/d	m ³ /d	l/ha/d	m ³ /d
Krk	250	1.640	250	505	60	105	60	57	2.000	60
Baška	250	395	250	681	60	20	60	44	2.000	20
Dobrinj	250	503	250	186	60	20	60	26	2.000	20
Malinska	250	834	250	1.012	60	20	60	44	2.000	20
Omišalj	250	925	250	827	60	180	60	83	60.000	13.500
Punat	250	590	250	466	60	27	60	66	2.000	20
Vrbnik	250	338	250	124	60	20	60	18	2.000	20
UKUPNO ŽUPANIJA		99.842		11.040				1.433		42.760

Količine vode za industriju u Općini Omišalj predstavljaju tehnološke vode koje se koriste u industrijskim procesima na tom području. To je ukupno 13.500 m³ vode ili 156 l/s. Ova voda ne spada u kategoriju vode za piće iako se za te potrebe može koristiti i voda za piće [1].

U tablici br. 9. proračunate su prosječne količine vode koje se troše u jednom danu po pojedinim kategorijama potrošača u turizmu i po pojedinim Gradovima i Općinama.

Tablica 9. Količine vode za plansko razdoblje do 2015.god. – prosječne količine vode po Gradovima i Općinama na otoku Krku [1]

OPĆINE I GRADOVI	PROSJEČNE KOLIČINE VODE							
	Hoteli		Kampovi		Kućanstva		Marine	
	l/st/dan	m ³ /dan	l/v/dan	m ³ /dan	l/r/dan	m ³ /dan	m ³ /dan	m ³ /dan
Krk	450	868	150	405	250	772	70	23
Baška	450	668	150	312	250	594	70	
Dobrinj	450	401	150	187	250	356	70	
Malinska	450	668	150	312	250	594	70	
Omišalj	450	1.269	150	592	250	1.128	70	
Punat	450	1.002	150	467	250	890	70	74
Vrbnik	450	267	150	125	250	238	70	
UKUPNO ŽUPANIJA		33.366		7.604		19.851		350

U tablici 10. dane su ukupne srednje prosječne količine vode koje se troše u jednom danu po pojedinim Gradovima i Općinama te je dan zbroj količina za cijelo područje otoka Krka.

Tablica 10. Količine vode za plansko razdoblje do 2015.god. – maksimalne dnevne količine vode po Gradovima i Općinama na otoku Krku po Gradovima i Općinama na otoku Krku [1]

OPĆINE I GRADOVI	MAKSIMALNE DNEVNE KOLIČINE VODE					
	UKUPNO	UKUPNO	UKUPNO	UKUPNO	UKUPNO	UKU
	Srednja dnevna kol.	Po vodoopskr. sustavima	Koef. max. dan. 1,20	Po vodoopskr. sustavima	Po vodoopskr. sustavima	s 20% gubitaka
	m ³ /dan		m ³ /dan	m ³ /dan	l/s	l/s
Krk	4.435	35.628	5.322	42.754	495	619
Baška	2.734		3.281			
Dobrinj	1.699		2.039			
Malinska	3.504		4.205			
Omišalj	18.504		22.205			
Punat	3.602		4.322			
Vrbnik	1.500		1.380			
UKUPNO ŽUPANIJA	223.149	223.149	267.779	267.779	3.099	3.875

5. Determinacija izvorišta

Na području Primorsko-goranske županije se za vodoopskrbu koriste pretežno zahvati podzemnih voda, ali za pojedina područja su značajni i zahvati površinskih voda. Kapaciteti izvorišta se kreću od nekoliko l/s pa do više od 2 m³/s (Riječki vodovod). Vodoopskrba stanovništva i gospodarstva se vrši putem mnogobrojnih vodovodnih sustava različitih karakteristika.

Područje Primorsko-goranske županije je bogato oborinama, ali nejednolikog rasporeda. Odlučan utjecaj ima vrlo razveden reljef i to naročito planinski niz duž obale mora. Oborine se kreću od 950 mm na obali mora do 4000 mm na planinskim vrhovima. Sezonske promjene su izražene pa kišni periodi donose obilne količine vode i uzrokuju poplave krških polja, naročito uz rijeke, a ponekad vrlo dugi sušni periodi dovode do poteškoća u vodoopskrbi.

Osim za vodoopskrbu, voda se koristi za potrebe hidroelektrana, manjim dijelom za ribnjake (Čabranka, Kupa) i za navodnjavanje. Na ovom su području izgrađene dvije hidroelektrane: HE Rijeka i HE Vinodol. U Gorskom kotaru postoje tri male hidroelektrane na rijeci Čabranci i MHE Zeleni Vir.

Na Rječini je planirana akumulacija Kukuljani (Zoretići) koja je projektirana kao višenamjenski objekt (vodoopskrba i hidroenergetika), ali još uvijek nije u fazi realizacije. Razlog su financijski problemi (interesno udruživanje sredstava). Zbog toga su radi zahvaćanja vode u podzemlju provode hidrogeološki istražni radovi u zaleđu izvora Rječine. Zahvat u podzemlju bi za vodoopskrbu bio povoljniji jer vodu nije potrebno kondicionirati.

Planira se i akumulacija Križ potok u Gorskom kotaru koja bi bila vodoopskrbna akumulacija za šire područje, a višak vode bi se koristio za hidroenergiju.

5.1. Potencijalna izvorišta vode u podsustavu Rijeka

Za vodoopskrbu u slijedećem razdoblju postoji nekoliko izvora koji se mogu uključiti u vodoopskrbu. Ti se izvori nalaze na različitim lokacijama i različitog su karaktera.

5.1.1. Sliv izvora u gradu Rijeci

Izvor Marganovo – nalazi se na području grada Rijeke. To je stari izvor koji se koristio za tehnološke potrebe Tvornice papira. S obzirom da je ova tvornica prestala s radom, postoji mogućnost uključivanja ovog izvora u vodoopskrbu.

Izvor Marganovo se nalazi na lijevoj obali Rječine u krugu Tvornice papira. Računa se s njegovom minimalnom izdašnošću od 200 l/s [1].

Izvorište Grobnik je prema do sada izvedenim istražnim radovima područje potencijalnih zahvata vode iz podzemlja. Ovi zahvati vode se nalaze u zaleđu izvora Rječine te svih obalnih izvora vode u gradu Rijeci.

Prema do sada provedenim istražnim radovima, predviđa se mogući zahvat vode od 1 m³/s [1].

5.1.1.1. Sliv izvora u Bakarskom zaljevu

Potencijalno izvorište vode u slivu Bakarskog zaljeva su Ponikve. Zahvat voda u ovom izvoru još nije dovoljno istražen pa će to područje u slijedećem razdoblju zahtijevati opsežne istražne radove.

5.1.1.2. Sliv izvora od Plomina do Preluke

Izvorište Kristal u ovom slivu predstavlja značajan vodni potencijal. U području ovog izvora se nalazi jača koncentracija stalnog izviranja u priobalju. Iako su vršena opsežna hidrogeološka istraživanja sa svrhom kaptiranja tih voda, rješenja nisu realizirana. U slijedećem razdoblju treba izvršiti konačne istražne radove te izraditi probne zahvate da se utvrdi s kojim količinama vode možemo

raspolagati za potrebe vodoopskrbe. Pretpostavlja se da je moguć zahvat vode koji bi u minimumu davao 100 l/s [1].

5.1.1.3. Otoci

Na otocima Rabu, Cresu i Lošinju su mogućnosti zahvata vode za vodoopskrbu uglavnom iskorištene. Na otoku Krku postoje potencijali novih zahvata vode, ali su nedovoljno istraženi te je realizacija dvojbeno.

Izvorište Ponikve na otoku Krku s hidrogeološkog stanovišta predstavlja velik potencijal zahvata vode. Međutim, sam zahvat vode nije tako jednostavan. Zahvat vode iz akumulacije pokazuje da voda u akumulaciji bitno pogoršava svoju kvalitetu zbog toga što je plitka. Zbog toga kondicioniranje ove vode za upotrebu u vodoopskrbi zahtjeva visok stupanj tretmana. Zato se razmišlja o što većim količinama vode zahvaćene iz podzemlja. Za ove podzemne i površinske zahvate su potrebni istražni radovi te zahvati dodatnih količina. U planskom se razdoblju, prema vodoopskrbnom planu Županije Primorsko-goranske, računa s ukupnim zahvatom voda u ovom izvorištu od 250 l/s [1].

Izvori u Bašćanskoj kotlini, posebno onaj u vapnenačkoj podlozi (EB 2), pokazuju da postoji mogućnost zahvata dodatnih količina vode. Za potrebe ovog prostora, prema Vodoopskrbnom planu dovoljnim se smatra korištenje dva bunara u vapnencima kako bi se ukupne količine vode zahvaćenih izvora dovele na nivo od 55 l/s.

Sliv Jezera kod Njivica predstavlja određeni potencijal podzemnih voda. Za sada se uspješno izgradio bunar kod Rovoznika, koristi se izvor Vrutak uz samo jezero, a moguće je i povećanje zahvata podzemne vode. Iz ovog sliva planira se zahvat od 25 l/s [1].

Tablica 10. Prikaz raspoloživih količina vode za piće u izvorištima danas i u planskom razdoblju za Županiju Primorsko-goransku [1]

VODOOPSKRBNI SUSTAV	IZVOR	IZDAŠNOST DANAS u l/s		max. teh. mogućnosti korištenja	IZDAŠNOST U PLANSKOM RAZDOBLJU u l/s
		min.	max.		
RIJEKA	Zvir	1.200	7.500	2.000	2.000
	Zvir II	550		600	600
	Martinščica	300	500	440	440
	Perilo	zaslan		230	230
	Dobra	30		50	50
	Dobrica	90	250	180	180
	Rječina	0	>35.000	1.800	1.800
	Marganovo				200
	Grobnik				1.000
Ukupno:		2.170		5.300	6.500

VODOOPSKRBNİ SUSTAV	IZVOR	IZDAŠNOST DANAS u l/s		max. teh. mogućnosti korištenja	IZDAŠNOST U PLANSKOM RAZDOBLJU u l/s
		min.	max.		
OPATIJA	Sredić	2		10	10
	Mala Učka	6		25	25
	Vela Učka	6		30	30
	Rečina	1		10	10
	Tunel Učka	10	80	70	70
	Kristal				100
Ukupno:		25		145	245
KRK	Jezero	0	64	120	120
	Ogreni	0	7	3	
	Ponikve	83		100	250
	Rovoznik, Grabrovik	0.7	11	11	11
	Draga baščanska, EB 1, EB 2, Sopot, Santis	29		48	55
	Ak. Tribalj	85		85	
Ukupno:		197,7		367	436
CRES	Vransko jezero	100	100	263	263
Ukupno:		100		263	263
PODS. RIJEKA		2.492,7		6.075	7.445,0
SVEUKUPNO:		3.263,5		6.877,8	8.149,0

5.2. Opći uvjeti za koncepciju razvoja vodoopskrbe

Na području Županije za dano plansko razdoblje postoje dovoljne količine vode za piće potrebne za vodoopskrbu. Problem je jedino u tome što raspoložive količine vode nisu raspoređene prema potrebama potrošnje. U slijedećoj tablici je dano stanje potreba za vodom i raspoloživih količina vode po pojedinim vodoopskrbnim sustavima.

Tablica 11. *Raspoložive količine vode i potrebne količine do 2015. god. [1]*

Br.	Vodoopskrbno poduzeće	Postojeća izvorišta	Buduća izvorišta	Potreba 2015.g.	Višak / manjak	Višak / manjak	Dovod vode
		l/s	l/s	l/s	l/s	l/s	l/s
1	2	3	4	5	3 - 5	4 - 5	8
1.	Komunalac OPATIJA	25	125	318	-293	-193	240
2.	Vodovod i kanalizacija RIJEKA	3.200	4.400	1.868	1.332	2.532	-456 (624)
3.	Vodovod Žrnovnica NOVI VINODOLSKI	450	450	356	94	94	
4.	Vodovod i čistoća CRES	210	210	275	-65	-65	
5.	Ponikve KRK	198	486	619	-421	-133	
6.	Vrelo RAB	148	148	209	-61	-61	
7.	Komunalac DELNICE	99	99	150	-51	-51	
8.	Grad ČABAR	60	60	40	20	20	
9.	Komunalac VRBOVSKO	59	59	40	19	19	
UKUPNO:		4.493	6.060	3.875	618	2.185	

Iz danih podataka (tablica11.) je vidljivo da na izvorištima ima ukupno dovoljno vode, ali nisu raspoređene prema potrebama. Zbog toga treba izvršiti spajanja pojedinih sustava te vodu prebaciti iz jednog sustava u drugi.

5.3. Analiza mogućnosti sanacija deficita vode u vodoopskrbnom podsustavu Rijeka

Vodoopskrbni podsustav Rijeka sastoji se iz vodoopskrbnih sustava Rijeka, Opatija, Krk te u daljnjoj budućnosti Cres – Lošinj.

5.3.1. Vodoopskrbni sustav OPATIJA

Vodoopskrbni sustav Opatija nema dovoljno vode ni danas. Rješenje nedostatnih količina je riješeno dovodom vode iz Rijeke i iz susjedne države Slovenije. Iz Rijeke je danas moguće cjevovodima dopremiti 240 l/s. Iz Slovenije se koristi 25 l/s, od toga 3 l/s odlazi u Klanu na područje vodoopskrbnog sustava Rijeka. Danas na ovom vodoopskrbnom sustavu ima 25 l/s vlastitih voda. S obzirom na izgrađene kapacitete, na ovom vodoopskrbnom području treba dodatno osigurati 28 l/s. Ako se ne računa s vodom iz susjedne države, treba osigurati 53 l/s. Ovu količinu vode je moguće dovesti postojećom trasom cjevovoda iz Rijeke rekonstrukcijom i dogradnjom cjevovoda te rekonstrukcijom “booster” stanice [1].

Ovaj plan predviđa istraživanje, a potom i mogući zahvat vode izvorišta “Kristal”. Taj je zahvat predviđen s planskom veličinom od 100 l/s pa su ukupna

buduća izvorišta planirana s 125 l/s. S tom količinom vode i 240 l/s vode koja se već danas može dopremiti iz Rijeke na raspolaganju bi bilo 365 l/s. Time su osigurane rezervne količine vode u izvorištima od 47 l/s ili 15 %. Za prihvatljivu rezervu vode u izvorištu od 30%, treba osigurati dodatnih 48 l/s vode iz vodoopskrbnog sustava Rijeka [1].

U slučaju da se u izvorištu Kristal ne zahvate vode, sve dodatne količine treba osigurati iz vodoopskrbnog sustava Rijeka. To je uz 100 l/s zamjenskih količina za izvorište Kristal i 48 l/s rezervnih količina vode ukupno 148 l/s [1].

Nakon ovog planskog razdoblja, daljnje povećanje količina vode je moguće povećanjem kapaciteta dovoda vode iz Rijeke.

5.3.2. *Vodoopskrbni sustav RIJEKA*

Vodoopskrbni sustav Rijeka ima dovoljno vode. Već danas i kod minimalnih izdašnosti izvora (presušuje Rječina) u ovom sustavu ima u izvorištima 3 puta više vode nego što se troši u tom sustavu. Zbog toga ovaj vodoopskrbni sustav daje vodu susjednim sustavima. Tako postoji tehnička mogućnost isporuke vode Opatijskom sustavu od 240 l/s. Voda se isporučuje i u vodoopskrbni sustav N. Vinodol, tj. u naselje Jadranovo i Drivenik u količini od 2,5 l/s [1].

Za ovo plansko razdoblje je predviđeno dovodenje vode iz ovog sustava na otok Krk te na otoke Cres i Lošinj. Za otok Krk treba osigurati 133 l/s, što s rezervom od 30% iznosi 272 l/s. Za otoke Cres i Lošinj nedostaje 30 l/s, što s rezervom od 30% iznosi 69 l/s. Za Opatijski vodoopskrbni sustav treba osigurati 53 l/s, odnosno 148 l/s s rezervom od 30%. Za vodoopskrbni sustav N. Vinodolski treba osigurati rezervu od 135 l/s [1].

Kad se ove količine vode pribroje potrošnji u samom vodoopskrbnom sustavu Rijeka, dobije se količina od 2642 l/s, odnosno 3.638 l/s s potrebnim rezervama za ostala područja i Rijeku. Bez osiguranja rezervnih količina u vodoopskrbnom sustavu Rijeka već danas ima dovoljno vode. S rezervnim količinama treba ići u predviđene nove zahvate [1].

5.3.3. *Vodoopskrbni sustav KRK*

Vodoopskrbni sustav Krk nema dovoljno količina za podmirenje potreba u planskom razdoblju, ali ih nema već ni danas. Svoje potrebe za vodom otok Krk podmiruje iz izvora na otoku te opskrbom s kopna. Na otoku su to jezero Njivice, izvorište Ponikve s kaptazama i galerijom te formiranim jezerom i bunari u Bašćanskoj kotlini. Ovi izvori nisu dostatni pa se koristi tehnološka voda iz jezera Tribalj (vode iz hidroelektrane Nikola Tesla) koja se prerađuje na uređaju za kondicioniranje vode "Jezero". Ukupni današnji kapaciteti ovih izvora su 198

l/s. Pored ovih količina vode, industrija izgrađena na sjevernom dijelu otoka (DOKI) koristi navedenu vodu iz jezera Tribalj i za tehnološke potrebe. Ukupni kapacitet sustava tehnološke vode je 280 l/s. Otok koristi 85 l/s, a industrija oko 80 l/s. Tako u ovom sustavu ima još rezervnih količina koje se planiraju koristiti u INA–rafineriji nafte Urinj koja je i vlasnik ovog sustava [1].

Za osiguranje dovoljnih količina vode treba raditi na zahvaćanju dodatnih količina na otoku te na dovodu kvalitetne vode za piće s kopna. Zahvati su mogući aktivnostima u izvorištu Ponikve, u slivu Jezera kod Njivica te u Bašćanskoj kotlini. U svim ovim područjima treba provesti istražne radove te na osnovu njih i potrebne zahvate. Prema do sada izvršenim radovima te aktivnostima planiranim po ovom planu, u ovom planskom razdoblju se mogu očekivati dodatne količine u Ponikvi s ukupno 250 l/s (dodatnih 150 l/s), u Bašćanskoj kotlini 55 l/s (dodatnih 26 l/s) te u slivu Jezera 25 l/s. To bi bile ukupne količine koje bi se koristile za vodoopskrbu otoka iz izvorišta na otoku u količini od 330 l/s. U ovom planskom razdoblju bi se prestale koristiti tehnološke vode i vode iz Jezera kao izvor pitke vode [1].

U planskom razdoblju je za industriju predviđeno 156 l/s tehnološke vode. Ove količine vode nalaze se u potrebnim količinama vode za otok Krk (619 l/s). kao izvor vode za tehnološke vode moguće je koristiti vode iz jezera Tribalj ili vode iz Jezera kod Njivica ili pitku vodu. S obzirom da je to dodatni izvor vode na ukupne količine vode raspoložive za opskrbu vodom (330 l/s) treba dodati ovih 156 l/s pa je to ukupno 486 l/s raspoloživih količina vode u izvorištima koja se koriste za ovaj vodoopskrbni sustav.

Dakle zbroje li se planirane količine u izvorištima i količina osigurane tehnološke vode, na otoku Krku bi bilo na raspolaganju ukupno 486 l/s. Za potrebe vodoopskrbe otoka treba osigurati dodatnih 133 l/s, odnosno s rezervom od 30% u izvorištima ukupno 319 l/s te 47 l/s tehnološke vode. U ovom planskom razdoblju te količine vode treba osigurati s kopna iz vodoopskrbnog sustava Rijeka [1].

Preko područja otoka Krka treba osigurati dodatne količine s kopna za područje otoka Cresa i Lošinja u visini od 30 l/s, odnosno 65 l/s, što s potrebama otoka Krka čini 163 l/s, odnosno 384 l/s [1].

Dovod vode s kopna će se izvesti u dvije faze. U prvoj fazi će se voda za potrebe prve etape ovog planskog razdoblja dovesti preko područja INA–rafinerije nafte Urinj iz vodospreme Šoići. Ovom cijevi će se osigurati 200 l/s. U drugoj fazi će se za konačno plansko razdoblje i daljnji razvoj dovesti preostale količine s izvorišta Rječine, odnosno iz zahvata na sjeverozapadnom dijelu Grobničkog polja.

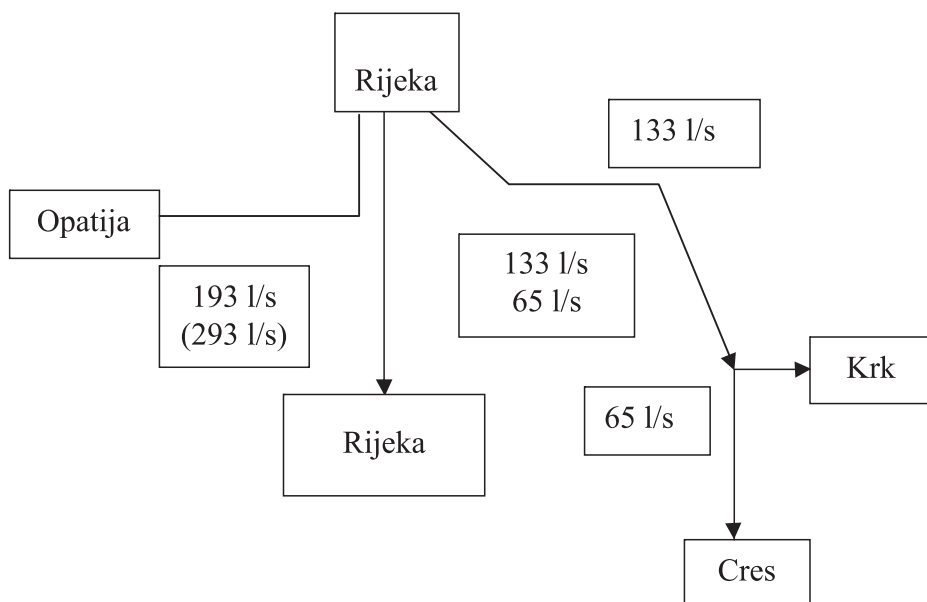
Za daljnji razvoj ovog područja je moguće koristiti dodatno zahvaćene količine na otoku te vode iz Gorskog kotara.

5.4. Računske sheme vodoopskrbnog podsustava Rijeka

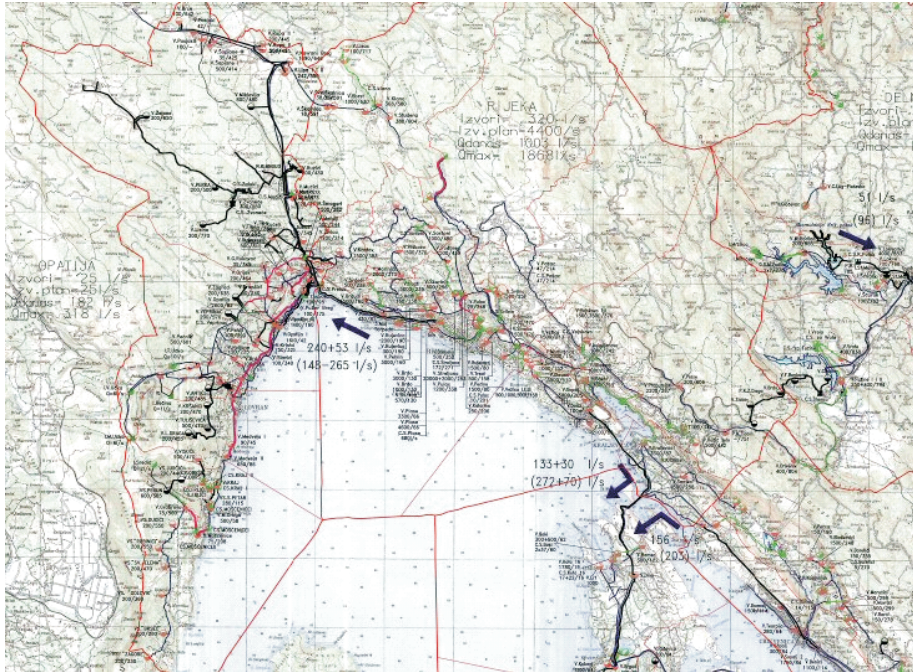
Na osnovu proračunatih količina vode potrebnih u pojedinim dijelovima vodoopskrbnog podsustava Rijeka i na osnovu postojeće izgrađenosti sustava izrađene su sheme vodoopskrbnog sustava. Osnovni pravci dogradnje su povećanje količina vode u pravcu Opatije i Krka.

U pravcu Opatije postojeći pravac opskrbe pojačavati će se prema potrebama razvoja. Za taj pravac planira se dobava 193 l/s vode odnosno 293 l/s, ako ne uspiju zahvati vode na slivu izvorišta Kristal.

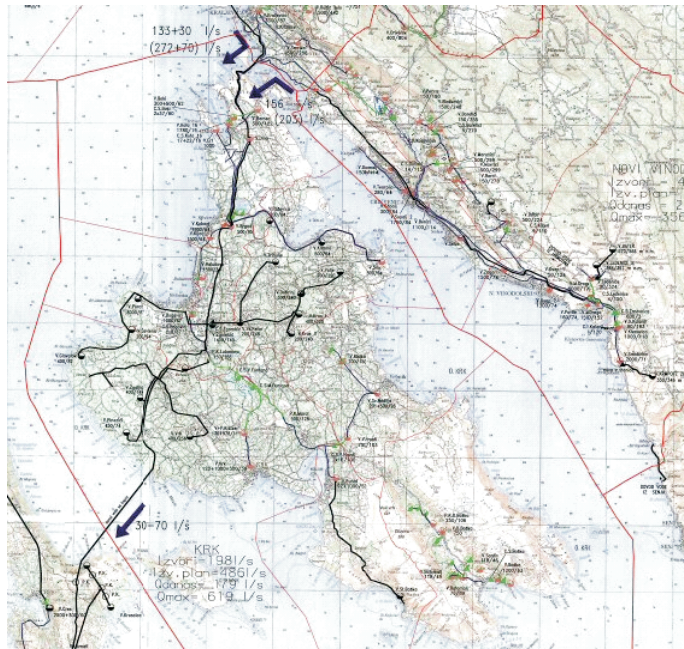
U pravcu otoka Krka potrebno je u I fazi osigurati 133 l/s (odnosno 319 l/s) za otok Krk i 30 odnosno 65 l/s za otoke Cres i Lošinj. S obzirom na tehničke mogućnosti graditi će se cjevovod kapaciteta 200 l/s iz postojećeg vodoopskrbnog sustava Rijeka. U narednim fazama dodatne količine vode trebati će se osigurati dogradnjom postojećeg vodoopskrbnog sustava Rijeka [1].



Slika 4. Shema Riječkog vodoopskrbnog sustava 2015.god. [1]



Slika 5. Shema Riječkog vodoopskrbnog sustava 2015. god. [1]



Slika 6. Shema vodoopskrbnog sustava na otoku Krku 2015. god. [1]

6. Zaključak

Otok Krk nema dovoljnih količina kvalitetne vode, kako za sadašnje potrebe tako i za budući razvoj. Iz podataka, analiza i proračuna danih u ovom radu to se dobro uočava. Zbog toga je nužno potrebna gradnja vodovoda koji će spojiti otok i riječki vodoopskrbni sustav. Izgradnja ovog vodovoda je u tijeku. Za sada su izvedeni radovi do Omišlja, a u toku je izvedba na izgradnji cjevovoda do Njivica. Ovaj cjevovod bi svakako trebalo produžiti do Malinske (Bogovića) te ga je potrebno crpljenjem spojiti na postojeći vodoopskrbni sustav iz izvorišta Ponikve. Time bi se postigla potrebna sigurnost vodoopskrbe svih potrošača na otoku Krku.

U daljnjoj fazi razvoja planira se ovim sustavom dovod vode na otok Cres i Lošinj gradnjom cjevovoda Bogovići – Valbiska – Merag – Cres. Time bi se osigurale dodatne količine vode za ovo područje Primorsko-goranske županije, koje danas ima dovoljnih količina vode iz Vranskog jezera, ali bi ovim sustavom dobili potrebnu sigurnost u opskrbi pitkom vodom.

Literatura

- [1] Mr. sc. Ivica Plišić, dipl. ing. građ. Vodoopskrbni plan Primorsko goranske županije, 2002.
- [2] Mr. sc. Ivica Plišić, dipl. ing. građ. Vodoopskrbni plan Otoka Krka, 1995.
- [3] Dr. sc. Ivan Gulić, Opskrba vodom, knjiga, 2002.
- [4] Prostorni plan Primorsko-goranske županije
- [5] Pravilnik o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće (NN 46/94)
- [6] Odluka o sanitarnoj zaštiti vode za piće na riječkom području Sl. nov. 6/94.

Usporedba režima pronosa suspendiranog nanosa rijeka Save i Drave

Comparison of Suspended Load Transport Regime of Sava River and Drava River

Nikola Štefanec*, Josip Rubinić**

Sažetak. U radu je provedena usporedba vodnog režima suspendiranog nanosa na dvama po duljini toka u Hrvatskoj najvećim rijekama – Savi i Dravi, i to za postaje Slavonski Brod na Savi i Botovo na Dravi. Utvrđeno je da se radi o vodotocima koji imaju različitu unutargodišnju raspodjelu vodne bilance, kao i različit režim pojava i pronosa suspendiranog nanosa. Utvrđeno je i da se ne podudaraju sezonske pojave maksimalnih koncentracija i pronosa nanosa – kod Drave se maksimumi i koncentracija i pronosa javljaju tijekom ljetnih mjeseci, dok se kod Save maksimalne koncentracije javljaju ljeti, ali maksimalni pronosi u travnju, kada su i protoci najveći. U radu je utvrđeno da je za oba vodotoka karakterističan vrlo naglašeni trend opadanja koncentracija te posebice pronosa nanosa.

Ključne riječi: suspendirani nanos, pronos nanosa, promjene vodnog režima, Sava, Drava

* 42230 Ludbreg, Ivana Gundulića 38, Hrvatska, E-mail: nikola-stefanec@net.hr

** Građevinski fakultet Rijeka, 51.000 Rijeka, V.C.Emina 5, Hrvatska, E-mail: jrubinic@gradri.hr

Abstract. Comparison of suspended load transport regime is carried out between the two longest rivers in Croatia – Sava and Drava, in stations Slavonski Brod on the river Sava and Botovo on the river Drava. It is identified that these watercourses have different interannual distributions of water balance, as well as different regimes of suspended load occurrence and transport. It is also identified that there is no correspondence in seasonal suspended load maximum concentrations and transport – for Drava River maximum concentration and transport occurs during summer months, while in case of Sava River maximum concentrations occurs during the summer, but the maximum transport occurs in April during the highest discharges. It is identified that both rivers have characteristics of very high decreasing trends of suspended load concentrations and particularly decreasing trends of suspended load transport.

Key words: suspended load transport, water regime changes, Sava, Drava

1. Uvod

Režim pronosa i sedimentacije nanosa u velikoj mjeri determinira značajke i razvoj nekog vodotoka, kao i njegovu morfologiju [1]. Na količinu riječnog nanosa utječu različiti faktori kao što su fizičko – geografski uvjeti (stupanj obraslosti, geološki sastav terena i njegova otpornost na eroziju), reljef terena (koncentracija i brzina otjecanja vode sa površine) te klimatološki faktori (intenzitet i količina oborina, temperature zraka i tla, režim topljenja snijega). Promjene u procesima vezanim uz nastajanje, pronos i sedimentaciju nanosa uzročno-posljedično su povezane i s promjenama niza drugih procesa na nekom slivu. I dok su regionalne značajke uobičajenih klimatoloških parametara (temperatura, oborina) kao i osnovnih hidroloških parametara (vodostaja, protoka) daleko izučenije [2], problematika istraživanja regionalnih značajki promjena u dinamici pronosa nanosa u daleko je manjoj mjeri predmet interesa istraživača [3]. Ipak, postoje naznake o prisutnim velikim promjenama u režimu pronosa nanosa (izraziti trend smanjenja) na vodotocima s područja Hrvatske [4,5].

Stoga je u radu provedena usporedba vodnog režima suspendiranog nanosa na dvama po duljini toka i veličini sliva u Hrvatskoj najvećim rijekama podunavskog sliva – Savi i Dravi. Radi se o vodotocima koji imaju različitu unutargodišnju raspodjelu vodne bilance, a također i režima pojava i pronosa suspendiranog nanosa. Ta je analiza provedena usporedbom raspoloživih prikupljenih podataka s postaja Slavonski Brod na Savi i Botovo na Dravi (Slika 1), koje imaju i relativno duge nizove raspoloživih podataka i o vodnoj bilanci, kao i o značajkama suspendiranog nanosa.

Hidrološka stanica Slavonski Brod osnovana je još 1855. g., ali se suspendirani nanos prati tek od 1960.g. Od ušća je udaljena 378.1 km, a površina sliva joj iznosi

50.850 km². Postaja Botovo osnovana je pod nazivom Žakanj za vrijeme Austro-Ugarske, počela je s radom 1873. godine. Udaljenost postaje od ušća je 226.8 km, a površina sliva 31.038 km².

Hidrološki podaci koji su analizirani u danom radu (karakteristične protoke, koncentracije i pronos suspendiranog nanosa) dobiveni su od strane Državnog hidrometeorološkog zavoda iz Zagreba, te obrađeni u diplomskom radu Štefanca [6]. U danim podacima koncentracije suspendiranog nanosa određene su na osnovu uglavnom dnevnih uzorkovanja (pri pojavama većih vodnih valova provode se i učestalija uzorkovanja tijekom dana) i filtracije nanosa u uzorku na filterskom papiru, te vaganja razlike težina osušenih filtarskih papira nakon takvog provedenog uzorkovanja i filtriranja. Dnevni pronosi suspendiranog nanosa određivani su tako da se srednja dnevna koncentracija suspendiranog nanosa otežapomnoži sa dnevnim protokom. Na osnovu tako dobivenih vrijednosti dnevnih pronosa nanosa dalje se izvode njihove karakteristične mjesečne i godišnje vrijednosti. S obzirom da se uzimanje uzoraka provodi uglavnom samo jednom na dan i to samo u jednoj točki profila, rezultate tako provedenih primarnih obrada u smislu njihove reprezentativnosti ipak treba uzeti s rezervom.

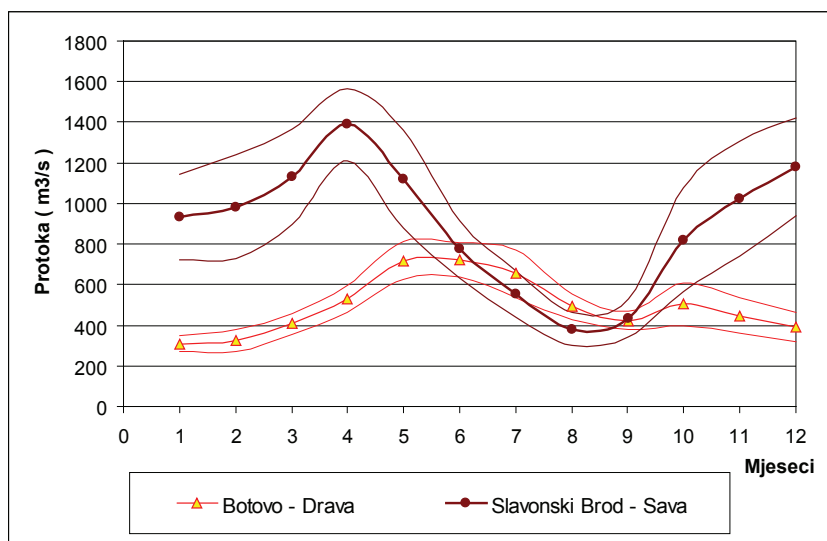
Podaci koji su dobiveni za postaju Botovo u rasponu su od 1967. do 2006. godine a za postaju Slavonski Brod od 1960. do 2006. godine. No, kod dijela obrada analizirano je kraće razdoblje njihova zajedničkog rada od 1973. do 1993. godine, s obzirom da je bilo i prekida u motrenjima, posebice tijekom ratnih godina.



Slika 1. Položaj analiziranih hidroloških postaja

2. Usporedba vodnog režima Save i Drave

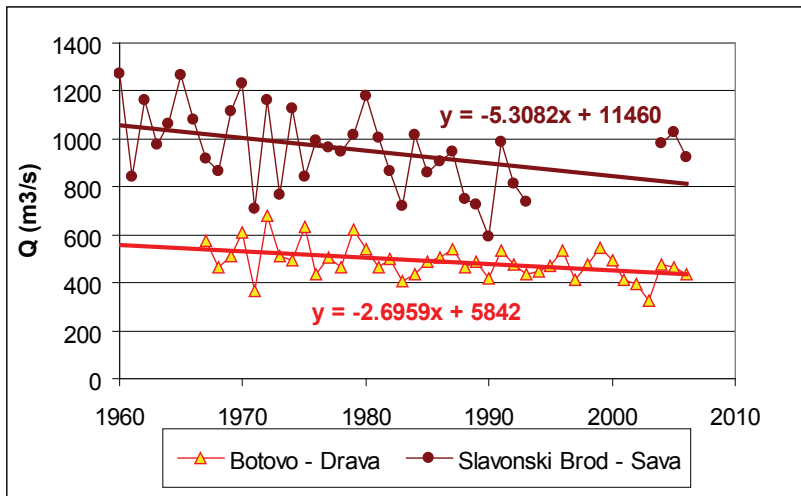
Vodni režim Save i Drave na analiziranim hidrološkim profilima najzornije je usporediti na razini karakterističnih mjesečnih i godišnjih podataka o protokama s analiziranih odabranih postaja Botovo – Drava i Slavonski Brod – Sava. Tako je na Slici 2 dan prikaz unutargodišnjih raspodjela srednjih mjesečnih protoka i odstupanja od prosjeka (+/- standardna devijacija), dok su na Slici 3 dani prikazi hoda srednjih godišnjih protoka, a na Slici 4 maksimalnih godišnjih protoka za spomenute postaje.



Slika 2. Unutargodišnja raspodjela srednjih mjesečnih protoka i odstupanja od prosjeka (+/- St. dev.) za razdoblje 1976.-1993.

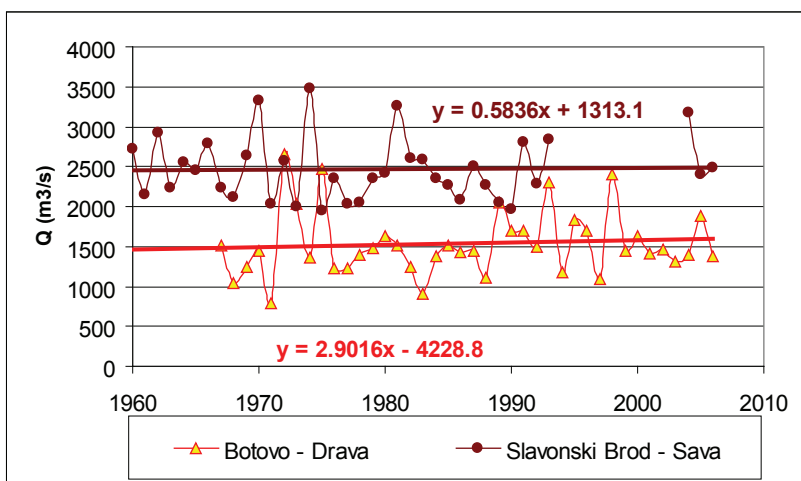
Vidljivo je da kod obje rijeke postoji prisutna bimodalna raspodjela srednjih mjesečnih protoka, pri čemu rijeka Sava ima naglašenije razlike u unutargodišnjim oscilacijama vodnih i sušnih razdoblja. Kod rijeke Save se najveće protoke u prosjeku javljaju u travnju kao posljedica koincidencije otapanja snijega u slivu i proljetnih oborina ($Q_{sr,mj.} = 1388 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), te u prosincu ($Q_{sr,mj.} = 1179 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) kao posljedica kasnojesenskih oborina. Kod rijeke Drave proljetni maksimumi su pomaknuti i razvučeni na svibanj, lipanj pa i srpanj ($Q_{sr,mj.} = 719 / 722 / 655 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), a vrlo blagi sekundarni maksimum u prosjeku se pojavljuje i u listopadu ($Q_{sr,mj.} = 503 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Unatoč toga što su tijekom analiziranog razdoblja prosječne godišnje protoke vrlo različite ($Q_{sr,god.SAVA} = 894 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $Q_{sr,god.DRAVA} = 494 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), kao što su različite i spomenute najveće prosječne mjesečne protoke, najmanje srednje mjesečne protoke su na obje analizirane postaje vrlo slične, pri čemu Sava inače globalno vodnija Sava ima naglašenije sušne hidrološke prilike. Kod rijeke Save

srednje mjesečne protoke su u prosjeku najniže u kolovozu ($Q_{\text{sr.mj.}} = 382 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), a kod Drave u rujnu ($Q_{\text{sr.mj.}} = 436 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).



Slika 3. Hod srednjih godišnjih protoka i pripadajući trendovi

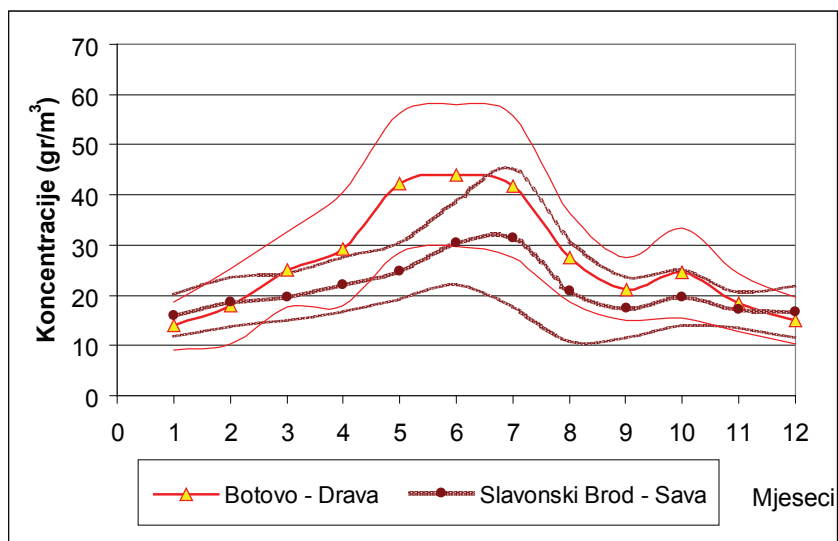
Rezultati usporedbe godišnjih hodova srednjih godišnjih protoka (Slika 3), iako formirani od nizova podataka različite duljine, ukazuju na prisustvo izraženih trendova opadanja srednjih godišnjih protoka kod obaju analiziranih postaja. Nasuprot tome hod maksimalnih godišnjih protoka pokazuje blage trendove porasta njihovih vrijednosti (Slika 4).



Slika 4. Hod maksimalnih godišnjih protoka i pripadajući trendovi

3. Usporedba koncentracija suspendiranog nanosa

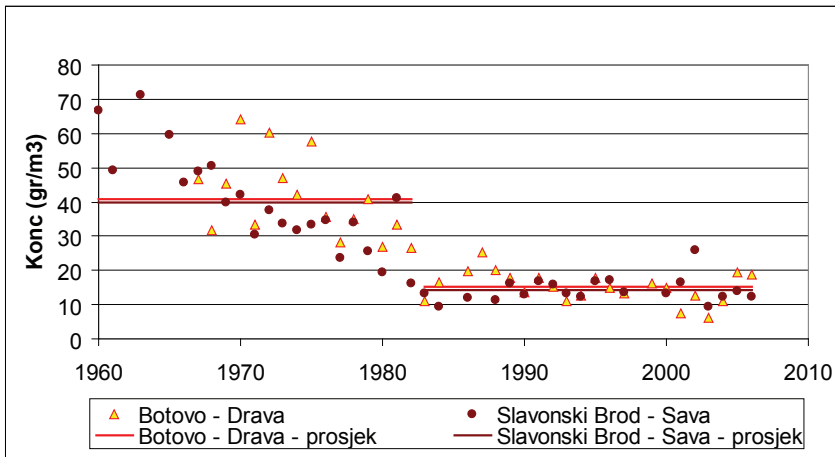
Usporede li se unutargodišnji hodovi kolebanja koncentracija suspendiranog nanosa na analiziranim postajama (Slika 5), vidljivo je da oni imaju unimodalnu raspodjelu, pri čemu su u prosjeku nešto veće koncentracije na Dravi ($K_{sr.god.} = 26.7 \text{ gr m}^{-3}$) nego li na Savi ($K_{sr.god.} = 21.3 \text{ gr m}^{-3}$). Kod postaje Botovo – Drava najveće se koncentracije puno ujednačenije javljaju, i u prosjeku su najveće tijekom razdoblja svibanj-srpanj ($K_{sr.mj.} = 42.4 / 43.9 / 41.6 \text{ gr m}^{-3}$), dok su kod postaje Slavonki Brod – Sava one u prosjeku najveće tijekom lipnja i srpnja ($K_{sr.mj.} = 30.5 / 31.5 \text{ gr m}^{-3}$). Interesantno je da se tijekom zimskih mjeseci (prosinac – veljača) prosječno veće koncentracije javljaju na Savi, dok su tijekom svih ostalih mjeseci veće prosječne koncentracije na Dravi.



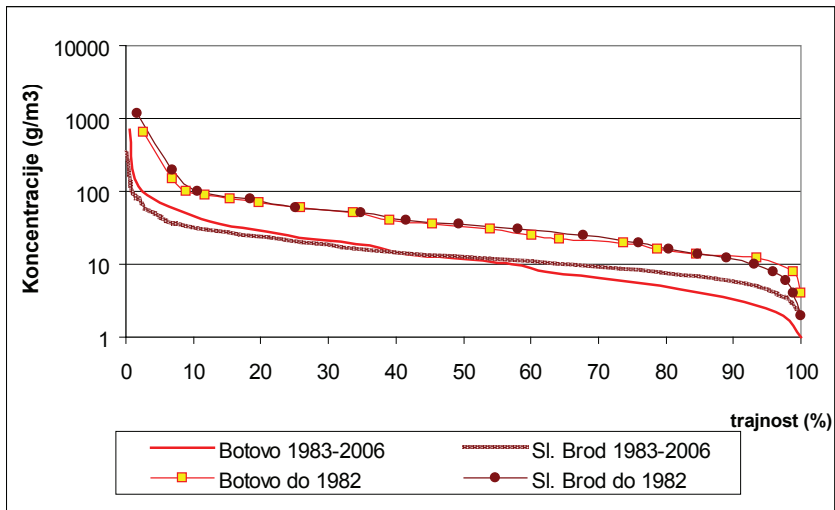
Slika 5. Unutargodišnja raspodjela srednjih mjesečnih koncentracija suspendiranog nanosa i odstupanja od prosjeka (+/- St. dev.) za razdoblje 1973.-1993.

Iz usporedbe hodova srednjih godišnjih koncentracija suspendiranog nanosa (Slika 6), vidljivo je da je kod obje analizirane postaje tijekom promatranog razdoblja došlo do vrlo značajnih promjena. Do cca 1982.g. i na Dravi i na Savi prisutno je postupno opadanje koncentracija suspendiranog nanosa, nakon čega se one stabiliziraju, ali na bitno nižim prosječnim vrijednostima. Tako je za analizirano razdoblje do zaključno 1982.g. srednja godišnja koncentracija suspendiranog nanosa na profilu Botovo – Drava iznosila 40.9 gr m^{-3} , a za razdoblje nakon toga čak 2.7 puta manje – 15.1 gr m^{-3} . Vrlo slična je i situacija s godišnjim hodom koncentracija suspendiranog nanosa zabilježena je i na profilu Slavonki Brod – Sava gdje je od 39.8 gr m^{-3} koliki je prosjek za razdoblje do 1982.

g., za razdoblje nakon toga do zaključno 2006.g. prosječna koncentracija nanosa pala za 2.8 puta i iznosi 14.2 gr m^{-3} .



Slika 6. Hod srednjih godišnjih koncentracija suspendiranog nanosa



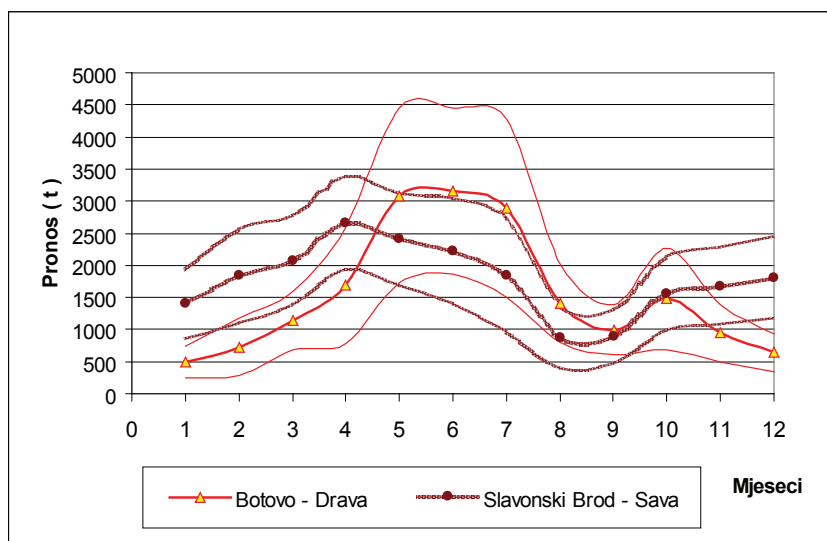
Slika 7. Usporedba krivulja trajnosti dnevni koncentracija suspendiranog nanosa

Radi uvida u karakter zapaženih promjena unutar navedenih razdoblja, provedena je i analiza učestalosti i trajnosti dnevni koncentracija suspendiranog nanosa (Slika 7). Utvrđeno je da su u razdoblju do 1982.g. koncentracije nanosa na oba analizirana profila imala sličnu raspodjelu učestalosti njihovih pojava. No, u razdoblju nakon toga (1983.-2006), osim što su vrlo bitno pale vrijednosti zabilježenih dnevni koncentracija suspendiranog nanosa, primjetljive su i blaže

promjene u smislu da su rjeđim trajanjima niže koncentracije na rijeci Savi, a pri duljim trajanjima niže koncentracije na rijeci Dravi.

4. Usporedba prosječnih pronosa suspendiranog nanosa

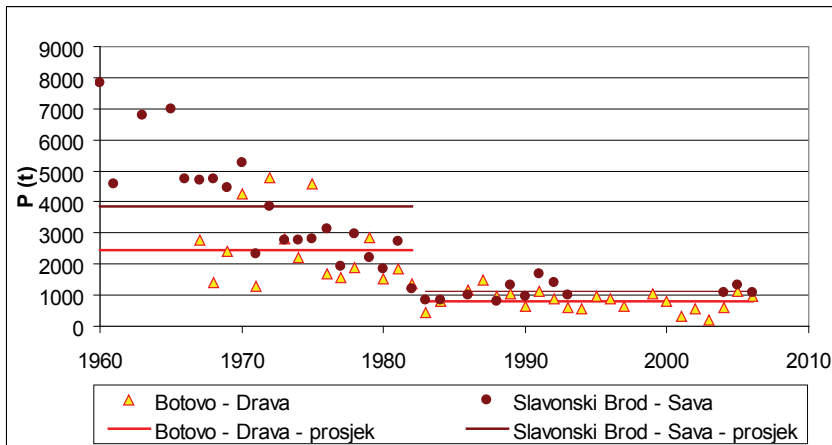
Provedena je i usporedba unutargodišnje raspodjele pronosa suspendiranog nanosa (Slika 8). Kod postaje Slavonski Brod – Sava najveći se prosječni pronosi javljaju u travnju (2657 t), a najniži u kolovozu (878 t) i rujnu (892 t). Kod postaje Botovo – Drava najveći se prosječni mjesečni pronosi javljaju u razdoblju svibanj – srpanj (Psr.mj. = 3085 / 3153 / 2886 t, a najniži su tijekom zimskih razdoblja – u siječnju s prosjekom od 493 t. Tijekom analiziranog zajedničkog razdoblja obrade (1973.-1993.) utvrđene su i bliske vrijednosti prosječnih godišnjih vrijednosti pronosa suspendiranog nanosa – na Savi kod Slavenskog Broda 1172 t, a na Dravi kod Botova 1553 t.



Slika 8. Unutargodišnja raspodjela srednjih mjesečnih pronosa suspendiranog nanosa i odstupanja od prosjeka (+/- St. dev.) za razdoblje 1973.-1993.

Analizirani hodovi srednjih godišnjih vrijednosti pronosa suspendiranog nanosa pokazuju, čak u još većoj mjeri nego li je to bio slučaj pri usporedbi koncentracija, vrlo značajno smanjenje pronosa suspendiranog nanosa u razdoblju počev od cca 1983.g. Kod postaje Botovo – Drava prosječan srednji pronos nanosa koji je za razdoblje do zaključno 1982.g. iznosio 2451 t pao je (za razdoblje 1983.-2006.) za 3 puta – na 812 t, a kod postaje Slavonski Brod – Sava sa 3842 t pao je za čak

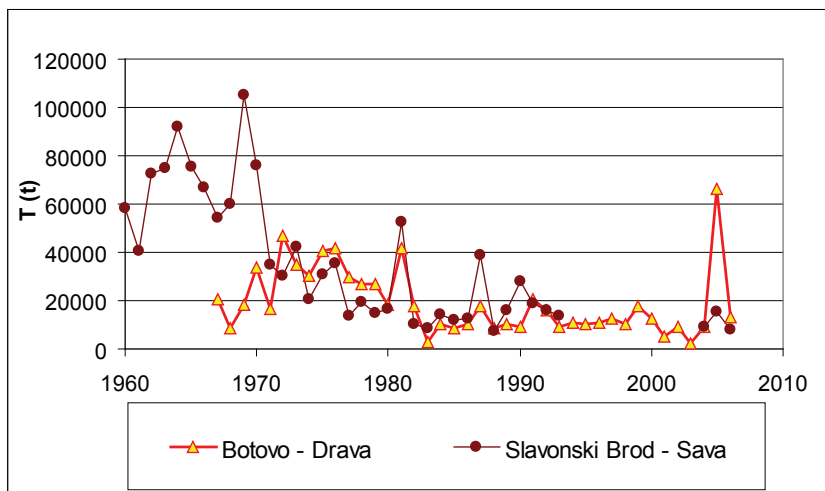
3.4 puta – na 1118 t. Radi se o posljedici koincidencije smanjenja koncentracija suspendiranog nanosa, kao i smanjenja srednjih godišnjih protoka.



Slika 9. Hod prosječnih godišnjih vrijednosti pronosa suspendiranog nanosa

5. Usporedba maksimalnih dnevnih pronosa suspendiranog nanosa

Kako je pri provedenoj usporednoj analizi vodnog režima Save i Drave na odabranim profilima utvrđeno da godišnje maksimalne vrijednosti protoka ne pokazuju trend smanjenja već je primjetan blagi trend porasta njihovih vrijednosti, bilo je interesantno provesti i analizu maksimalnih dnevnih pronosa suspendiranog nanosa (Slika 10). Kod te usporedbe, za razliku od rezultata provedenih analiza prosječnih godišnjih koncentracija kao i analiza ukupnih godišnjih pronosa suspendiranog nanosa, nisu utvrđene drastične promjene režima pronosa suspendiranog nanosa. Ipak, vidljivo je da su vrlo naglašene razlike u hodu godišnjih vrijednosti maksimalnih dnevnih pronosa suspendiranog nanosa prisutne, ali samo na postaji Slavonski Brod – Sava, i to s drugačijim vremenskim inkrementom – za razdoblje od prvih 11 analiziranih godina (1960.-1970.) kada su zabilježene uglavnom višestruko veće vrijednosti dnevnih pronosa nanosa u odnosu na kasnije razdoblje. Kod postaje Botovo – Drava nikakve bitne razlike opadanja maksimalnih dnevnih pronosa suspendiranog nanosa nisu uočljive, pa je upravo i maksimalna vrijednost dnevnog pronosa (66.216 t) zabilježena praktički na kraju promatranog razdoblja – 2005.g.



Slika 10. Hod maksimalnih dnevnih godišnjih pronosa suspendiranog nanosa

6. Zaključci

Rezultati provedenih obrada vodnog režima, kao i režima pojava i pronosa koncentriranog nanosa na dvama odabranim postajama na slivovima Drave (Botovo) i Save (Slavonski Brod) pokazali su njihove sličnosti i različitosti. Te se sličnost se prije svega ogledaju u prisutnom trendu opadanja srednjih godišnjih protoka, kao i u još naglašenijim opadanjima koncentracija i pronosa suspendiranog nanosa počev od 1983.g. Pri tome nije zapaženo smanjenje maksimalnih dnevnih pronosa suspendiranog nanosa iz razloga što je utvrđeno da niti maksimalne dnevne protoke na analiziranim postajama nemaju trend smanjenja. No, obzirom na koincidenciju opadanja i srednjih godišnjih protoka i koncentracija suspendiranog nanosa, utvrđene su višestruko manje vrijednosti prosječnih pronosa suspendiranog nanosa tijekom razdoblja 1983.-2006. u odnosu na analizirano prethodno razdoblje. Tako je pronos nanosa na postaji Botovo Drava pao za 3 puta, a na postaji Slavonski Brod – Sava čak 3.4 puta u odnosu na ranije razdoblje.

Utvrđeno je i da se ne podudaraju sezonske pojave maksimalnih koncentracija i pronosa nanosa – kod Drave se maksimumi i koncentracija i pronosa javljaju tijekom ljetnih mjeseci, dok se kod Save maksimalne koncentracije javljaju ljeti, ali maksimalni pronosi u travnju, kada su i protoci najveći.

Obzirom na vremensku podudarnost zapaženih drastičnih promjena u režimu pronosa – odnosno smanjenja pronosa nanosa na oba analizirana profila/vodotoka,

unatoč različitog stupnja i dinamike realizacije objekata HE postrojenja u njihovim koritima duž toka, provedene analize u ovom radu ne govore u prilog postavci da se promjene u režimu njegova pronosa mogu ponajviše pripisati djelovanju akumulacija i drugih objekata HE postrojenja. Kako to nije bila tema provedenih obrada, sasvim je sigurno da je pri budućim istraživanjima kao moguće uzročnike tih promjena nužno detaljnije izučiti i regionalno prisutne globalne klimatske promjene/varijacijama, a nužno je istražiti i eventualne promjene u metodologiji uzorkovanja i obrade podataka o suspendiranom nanosu.

Literatura

- [1] Morris, L.G., Fan J. Reservoir sedimentation handbook. IMCGraw-Hill, New York, 1998.
- [2] Bolle H.J., Mediterranean Climate – Variability and Trends. Springer Verlag, 2003.
- [3] Bondar C, Buja, C., Harabagiu E. Variation and trend of the water, sediment and salt runoff for the Danube river, at the inlet in our country during the period 1840-1992. Proc. of the XVII-th Conference of the Danube Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, Budapest: 671-679, 1994.
- [4] Bušelić, G., Rubinić, J. Comparison suspended load transport regime at characteristic hydrological stations in Croatia. Procc: Morell. M., Procc. Int. Conf. Balwois 2008. Balkan Institute for Water and Environment, Skopje, 2008.
- [5] Bonacci, O, Oskoruš, D. Hidrološke promjene duž rijeke Drave u Hrvatskoj s naglaskom na pronos suspendiranog nanosa. Hrvatska vodoprivreda, 40: 984-996, 2008.
- [6] Štefanec, N. Usporedba režima pronosa suspendiranoga nanosa rijeka Save i Drave, Diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2008.

Utjecaj oscilacija vodnih masa u vodospremi na hidrauličke gubitke u vodoopskrbnim sustavima

Influence of oscillations of water masses in the water reservoir on the hydraulic losses in water supply systems

Elvis Žic*, Goran Volf*, Duško Obradović**

Sažetak. U ovom radu analiziran je utjecaj oscilacija vodnih masa u vodospremama na linijske i lokalne gubitke u gravitacijskim i potisnim vodoopskrbnim sustavima. Hidrauličke analize na takvim sustavima dovode do saznanja i smjernica za smanjenje ukupnih gubitaka, a time i smanjenja ukupnih financijskih troškova u sustavu. Zbog velikih duljina cijevi posebno su važni linijski gubici vezani za dovodne cjevovode prema vodospremi, te linijski gubici u distributivnim cjevnim vodovima. Hidrauličko dimenzioniranje vodosprema kao i vodotornjeva sastoji se od određivanja ukupnog volumena vodne komore V_{UK} , te dimenzioniranja dovodnog i odvodnog cjevovoda. Vodne ili rezervoarske komore moraju prihvatiti količinu vode potrebnu za pokrivanje razlika između dotoka (gravitacijskog ili potisnog) i potrošnje vode, te količinu vode za gašenje požara i sigurnosnu rezervu u slučaju kvara crpke. U radu su dane analize promjene potrošnje vode u ovisnosti o tipu i karakteru naselja, gospodarskom razvoju, te tehnološkom procesu industrije. Dodatno su provedene analize promjena oscilacija vodnih masa u vodospremi o tipu naselja, te njezin utjecaj na promjene hidrauličkih parametara, radnih tlakova i linijskih gubitaka u gravitacijskom i potisnom vodoopskrbnom sustavu.

Ključne riječi: vodospreme, hidraulička analiza, oscilacije vodnih masa, gubici u vodoopskrbnom sustavu, radni tlakovi

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci; Viktora Cara Emina 5; Rijeka; elvis.zic@gradri.hr, goran.volf@gradri.hr

** Ri-gradnja d.o.o., Braće Manjac 13; Rijeka; obradovicdusko@yahoo.com

Abstract. Hydraulic analysis performed on water reservoirs and water towers lead to knowledge and guidelines for further reduction of total losses in the pipe water supply systems, and thus reducing overall financial costs in the system. Due to very long pipes distance are especially important line losses related to pipelines carrying water to the water reservoir, and line losses in distribution pipelines. Hydraulic design of water reservoirs consists of determining the total volume of water chambers V_{TOT} , and dimensioning of pipelines carrying water to and off the water reservoir. Water tank or chamber must accept the amount of water needed to cover the difference between inflow (gravitational or pressure) and water consumption, and the amount of water for fire extinguishing and security reserve in case of pump failure or pressure probation. The paper provides analysis of changes of water consumption depending on the type and character of settlements, economic development, and technological process industry. Further the analysis of changes of water mass oscillations in the water reservoirs on the type of settlement, and its effect on the changes of hydraulic parameters, the working pressure and line losses in gravitational and pressure water supply system.

Key words: water reservoir, hydraulic analysis, oscillations of watery masses, losses in the water supply system, working pressures

1. Uvod

Hidraulički gubici (linijski i lokalni) u vodoopskrbnim sustavima neposredno su povezani sa ukupnim gubicima u sustavu. Zbog velikih transporta masa vode uslijed prepumpavanja posebno su važni hidraulički gubici vezani za dovodne cjevovode prema vodospremi, te hidraulički gubici na distributivnim cijevnim vodovima [1],[2]. Hidrauličko dimenzioniranje vodosprema i vodotornjeva sastoji se od određivanja ukupnog volumena vodne komore V_{UK} , te dimenzija dovodnog i odvodnog cjevovoda. Dobro dimenzioniran ukupni volumen vodne komore VK predstavlja važnu ulogu za sigurnu vodoopskrbu područja koje ona opskrbljuje, u pogledu sigurne dugoročne eksploatacije vode i osiguranja potrebnih radnih tlakova na potrošačkim jedinicama. Vodne ili rezervoarske komore sadrže količinu vode potrebnu za pokrivanje razlika između dotoka (gravitacijskog ili potisnog) i potrošnje vode u toku dana – operativna rezerva, te količinu vode za gašenje požara – protupožarna rezerva i sigurnosnu rezervu vode za osiguranje vodoopskrbe u slučaju kvara crpke ili tlačnih proba.

Promjene radnih tlakova u cijevnim sustavima uzrokuju niz nepoželjnih posljedica na rad i učinkovitost vodoopskrbnog sustava [3]. Neke od tih posljedica su pojava žilavog i krhkog loma vodoopskrbnih cijevi, lom zbog umaranja, pojava abrazije, kavitacije, korozije uz naprezanje, korozije uz umaranje i slično [2]. Pojava žilavog loma nastupa kada je zavareni cijevni vod opterećen većim

napreznjem od mogućeg dozvoljenog, pri čemu dolazi do vidljivih deformacija cijevi. Krhki lom se događa kod vrijednosti napreznja vodoopskrbnih cijevi ispod granice razvlačenja. U praksi se javlja kada je temperatura pitke vode u eksploataciji veća od prijelazne temperature, odnosno temperature koja nastaje pri prijelazu iz žilavog u krhko stanje cijevi. Lom zbog umaranja nastaje uslijed dugotrajnih promjenljivih radnih tlakova u vodoopskrbnim cijevima [3]. Ukoliko je broj promjena napreznja (radnih tlakova) ispod 10^5 ciklusa napreznja obično se govori o niskocikličkom napreznju (*Low Cycle Fatigue*), dok se za vrijednosti iznad 10^6 ciklusa govori o visokocikličkom napreznju (*High Cycle Fatigue*), [3]. Napreznja u cijevima mogu biti posljedica djelovanja hidrodinamičkih sila i dinamičkih promjena temperature vode, značajnih kod prijelaza iz zimskog u ljetni period eksploatacije. Abrazija (vodna erozija) i kavitacija se najčešće povezuju uz različite cjevovode, potisne sustave, objekte pod tlakom i slično. Djelovanje kavitacije u vidu različitih turbulentnih strujanja u zavarenim cjevovodima (posljedica utjecaja račvanja, suženja i proširenja, skretanja i sl.) vrlo je teško obuhvatiti hidrauličkim proračunima.

Gore navedeni uzroci su u većoj mjeri posljedica nesavjesnosti i nedovoljne brige komunalnih djelatnika i samih projektanata. Kako bi se takve pojave izbjegle ili smanjile potrebno je imati:

1. **znanje** - kako bi se postavili ispravni zahtjevi za kvalitetnu eksploataciju pitke vode, mjerodavni parametri, uvjeti, kriteriji prihvatljivosti vezani za dimenzije, materijal i tehnologiju građenja vodoopskrbnih cijevi, te kontrolu u periodu korištenja vodoopskrbnog sustava, te
2. **savjesnost** – kako bi se ispravno postavljene zahtjevi, postupci i kriteriji prihvatljivosti dosljedno provodili [4], [5], [6].

2. Osnovne pretpostavke provedene analize

Vodospreme i vodotorne predstavljaju vodne ili hidrotehničke građevine u vodoopskrbnom sustavu, kojima je namjena akumuliranje pitke vode, te osiguranje potrebnih radnih tlakova na potrošačkim jedinicama (izljevnim mjestima). Osnovni zadaci svake vodospreme i vodotorne jesu:

1. osiguranje operativne rezerve pitke vode V_{RO} u svrhu akumuliranja vode radi izravnjanja dnevne neravnornosti (oscilacija) potrošnje vode za različite djelatnosti (stanovništva, uslužnih djelatnosti, industrije i sl.),
2. osiguranje sigurnosne rezerve pitke vode V_{RS} za vrijeme prekida dotoka vode u vodospremu/vodotoranj (prekid transporta pitke vode dolaznim opskrbnim cjevovodom, prekid rada crpnih agregata i sl.).

3. osiguranje protupožarne rezerve vode V_{RP} u skladu sa zakonima i propisima protupožarne zaštite u vodoopskrbnom području, protupožarne hidrantske mreže i sl.
4. osiguranje potrebnih radnih tlakova u vodoopskrbnoj mreži, određivanjem visinskog položaja vodospreme/vodotornja i razine vode u vodnim (prekidnim) komorama prema potrošačkim jedinicama.

Potrošnja vode u pojedinom vodoopskrbnom sustavu gotovo nikada nije ravnomjerna, već oscilira u toku jednog sata, dana, odnosno godine. Značajne oscilacije (neravnomjernosti) potrošnje pitke vode proizlaze iz razloga što se voda u toku jednog sata ili dana distribuira različitim potrošačima sa neujednačenim izlaznim protokom [1]. Drugi uzrok znatnijih dnevnih oscilacija potrošnje vode treba tražiti u povećanju broja stanovnika i turista u proljetnom i ljetnom periodu, kada se zbog povećane potrošnje vode stvaraju znatnije razlike između dotoka i istjecanja vode iz vodospreme [7]. Dodatni problem se javlja kod usklađivanja proizvedenih količina pitke vode sa količinama koje se troše na određenom području, u istom vremenskom razdoblju. Gore navedeni uzroci su posljedično vezani za tehničke i financijske parametre vodoopskrbnog sustava. Primjera radi, u ljetnom periodu tokom godine (izrazita potrošnja pitke vode – moguća pojava presušenja izvora) transport vode potisnim sustavima bi trebalo provoditi u noćnim satima zbog smanjenja električne potrošnje. Pogodno je crpljenje vode prema vodospremi izvoditi i u vremenskom periodu najvećih satnih potrošnji opskrbnog područja, jer se na taj način smanjuje razlika dolaznog i odlaznog dotoka (manji volumen operativne rezerve V_{RO}).

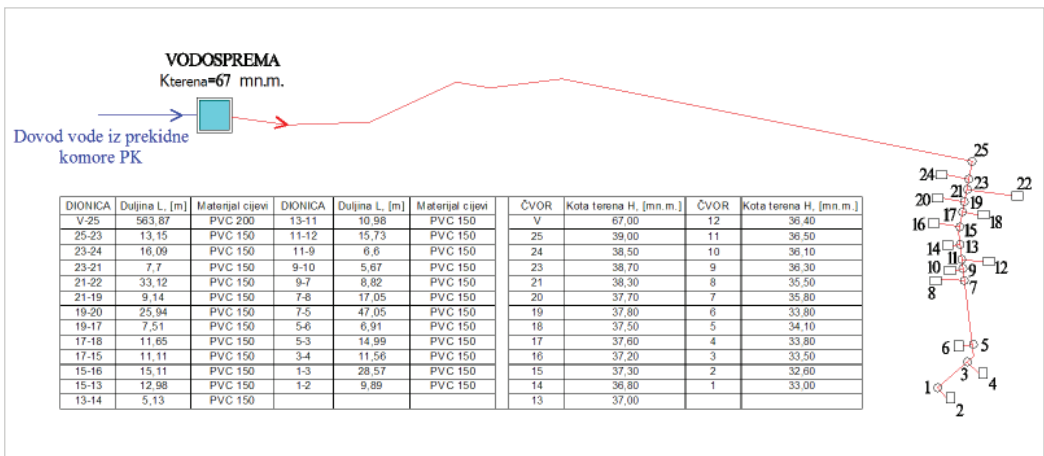
Volumen vodospreme ovisi o režimu potrošnje i dotoku pitke vode. Stoga je za svaku vodoopskrbnu zonu (naselje) koje se opskrbljuje vodom iz vodospreme potrebno odrediti:

- **satni režim potrošnje vode tokom dana**, ovisno o tipu naselja/vodoopskrbne zone, razvoju šire regije i slično,
- **režim dotoka u vodospremu**. Dotok može biti gravitacijski (kontinuirani tokom 24^h dnevno ukoliko je izvor pitke vode smješten na većoj nadmorskoj visini u odnosu na vodnu komoru) i potisni s crpkama kada je režim dotoka ovisan o radu crpke (izvor pitke vode ima manju potencijalnu energiju položaja u odnosu na vodnu komoru).

Svaki vodoopskrbni sustav sadrži niz objekata i uređaja koji su u funkcionalnoj zavisnosti. Nefikasnost pojedinog objekta ili uređaja na samom početku ili u određenom dijelu vodoopskrbnog sustava može ugroziti efikasnost cjelokupnog sustava. Stoga je bitno sagledati pojedine elemente unutar vodoopskrbnog sustava, okarakterizirati ih, te ukoliko je to financijski moguće provesti adekvatnu

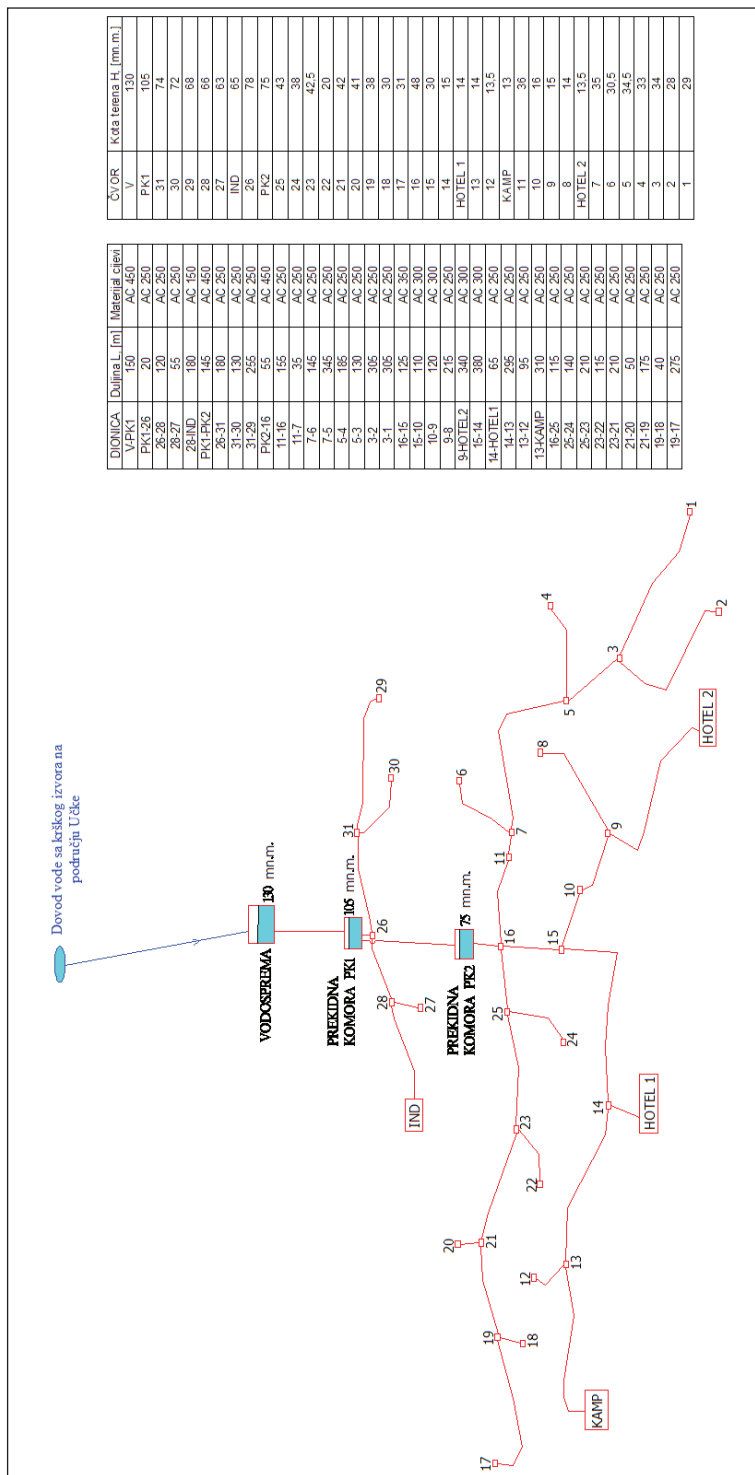
analizu u svrhu izbora najboljeg rješenja [5], [8]. Zbog te činjenice u nastavku će se prikazati postupak određivanja ukupnog volumena vodne komore V_{UK} na dva jednostavna hipotetski definirana vodoopskrbna sustava, kako bi se moglo analizirati utjecaj oscilacija vodnih masa u VK tokom jednog dana na promjene hidrauličkih parametara unutar vodoopskrbnog sustava.

Prilikom dimenzioniranja vodoopskrbnog sustava i hidrauličkog proračuna VK, potrebno je odrediti mjerodavne količine pitke vode za opskrbu stanovništva, turista (hotela, kampova, odmarališta i sl.), industrije, količine vode koje će se trošiti u slučaju požara te količine vode za vlastite potrebe vodovoda (za ispiranje cijevi ili u svrhu tlačnih proba). Analiza proračuna VK u ovom radu provodi se na tipu manjeg ruralnog naselja sa 2000 stanovnika i manjeg naselja (6000 stanovnika) sa industrijom (potrebe u industriji su 4 l/s za period od 6-22^h). Za slučaj manjeg ruralnog naselja (Slika 1.) maksimalna dnevna potrebna količina pitke vode za opskrbu stanovništva (bez industrije) iznosu $Q_{max,dan} = 1089 m^3/dan$.



Slika 1. Shematski prikaz vodoopskrbnog sustava ruralnog naselja

Kod drugog karakterističnog slučaja manjeg naselja sa industrijom (Slika 2.) maksimalna dnevna potrošnja vode iznosi $Q_{max,dan} = 6506 m^3/dan$.



Slika 2. Shematski prikaz vodoopskrbnog sustava manjeg naselja sa industrijom

Maksimalne satne potrošnje vode proračunate su množenjem maksimalnih dnevnih potrebnih količina vode za pojedine kategorije potrošača i koeficijenta maksimalne satne neravnomjernosti. Za slučaj manjeg grada sa industrijom maksimalna satna potrošnja svih potrošača u vodoopskrbnoj mreži iznosi $Q_{\max, \text{sat}} = 152,83$ l/s, dok kod tipa ruralnog naselja ona ima vrijednost $Q_{\max, \text{sat}} = 22,66$ l/s.

3. Oscilacije vodnih masa u vodnoj komori vodospreme

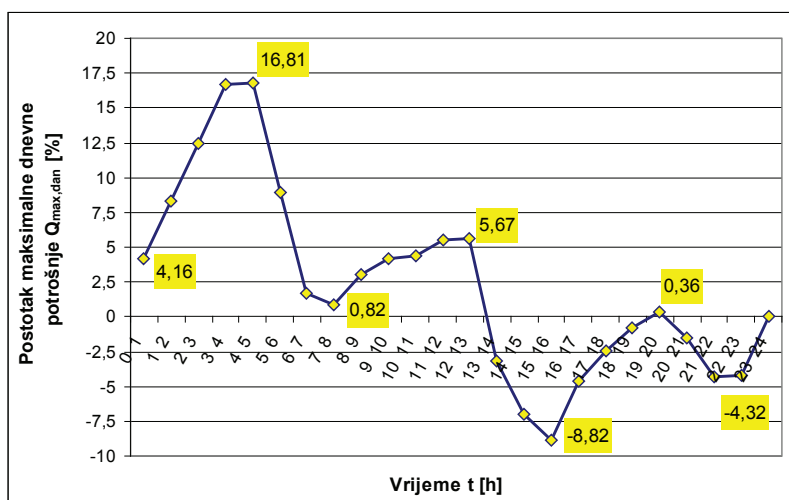
U nastavku je proveden proračun određivanja operativne rezerve i oscilacija vodnih masa u vodnoj komori vodospreme za slučaj gravitacijskog i potisnog dotoka pitke vode za primjer ruralnog naselja i manjeg naselja sa industrijom, u kojima glavnu ulogu imaju promjenjive vrijednosti maksimalnih satnih potrošnji (stupac 2 u Tablici 1. i 2.).

Tablica 1. Primjer 1 - RURALNO NASELJE – gravitacijski dotok

Sati od - do	Satna potrošnja % $Q_{\max, \text{dan}}$	Dotok u VK % $Q_{\max, \text{dan}}$	Višak dotoka % $Q_{\max, \text{dan}}$	Manjak satne potrošnje % $Q_{\max, \text{dan}}$	Operativni volumen VK % $Q_{\max, \text{dan}}$
1	2	3	4	5	6
0 - 1	0	4,16	4,16		4,16
1 - 2	0	4,16	4,16		8,32
2 - 3	0	4,16	4,16		12,48
3 - 4	0	4,16	4,16		16,64
4 - 5	4	4,17	0,17		16,81
5 - 6	12	4,17		7,83	8,98
6 - 7	11,5	4,17		7,33	1,65
7 - 8	5	4,17		0,83	0,82
8 - 9	2	4,17	2,17		2,99
9 - 10	3	4,17	1,17		4,16
10 - 11	4	4,17	0,17		4,33
11 - 12	3	4,17	1,17		5,5
12 - 13	4	4,17	0,17		5,67
13 - 14	13	4,17		8,83	-3,16
14 - 15	8	4,17		3,83	-6,99
15 - 16	6	4,17		1,83	-8,82
16 - 17	0	4,17	4,17		-4,65
17 - 18	2	4,17	2,17		-2,48
18 - 19	2,5	4,17	1,67		-0,81
19 - 20	3	4,17	1,17		0,36
20 - 21	6	4,16		1,84	-1,48
21 - 22	7	4,16		2,84	-4,32
22 - 23	4	4,16	0,16		-4,16
23 - 24	0	4,16	4,16		0,00
Ukupno	100%	100%	35,16%	35,16%	25,63 %

U slučaju gravitacijskog dotoka pitke vode u vodnu komoru, dotok je konstantan tokom dana i iznosi 4,17 % maksimalne dnevne potrošnje $Q_{max,dan}$, dok se kod potisnog pitka voda transportira kroz određeni vremenski period (jednosmjenski, dvosmjenski ili višesmjenski rad crpki), pa su satni dotoci izraženiji u odnosu na slučaj gravitacijskog dotoka.

Primjer 1 - Proračun potrebne operativne rezerve V_{RO} vodne komore za slučaj ruralnog naselja uz gravitacijski dotok u vodospremu. U stupcu 2 Tablice 1. upisane su vrijednosti maksimalnih satnih potrošnji u određenom periodu dana, uzete kao određeni postotak maksimalne dnevne potrebne količine vode za opskrbu ruralnog naselja. U periodu od pola noći do 1^h postoji konstantan dotok u iznosu od 4,16 % maksimalne dnevne količine, dok u tom istom vremenskom periodu nema potrošnje naselja. Zaključujemo da se u VK vodospreme pojavio višak vode u iznosu od 4,16 % maksimalne dnevne količine vode. U periodu između 5 i 6 sati dolazi do većeg otjecanja iz VK u odnosu na dotok vode, pa se u tom vremenskom periodu pojavljuje manjak vode u iznosu od 7,83 % maksimalne dnevne potrošnje naselja. Kada se na taj način zbroji ukupan višak vode u VK, on mora odgovarati manjku satne potrošnje u toku jednog dana. Ukupna vrijednost manjka, odnosno viška vode izražena kao postotak maksimalne dnevne količine vode predstavlja operativnu rezervu vodne komore V_{RO} . Konkretno, u ovom slučaju za ruralno naselje potreban volumen operativne rezerve iznosi $V_{RO} = 0,2563 * Q_{max,dan}$ m³. U stupcu 6 Tablice 1. prikazana je kumulativna promjena operativnog volumena VK, odnosno promjena razina vode u VK u ovisnosti o maksimalnoj satnoj potrošnji i dotoku vode. Može se vidjeti da oscilacije razine vode u VK karakterizira 6 ekstrema označenih žutom bojom, Slika 3.

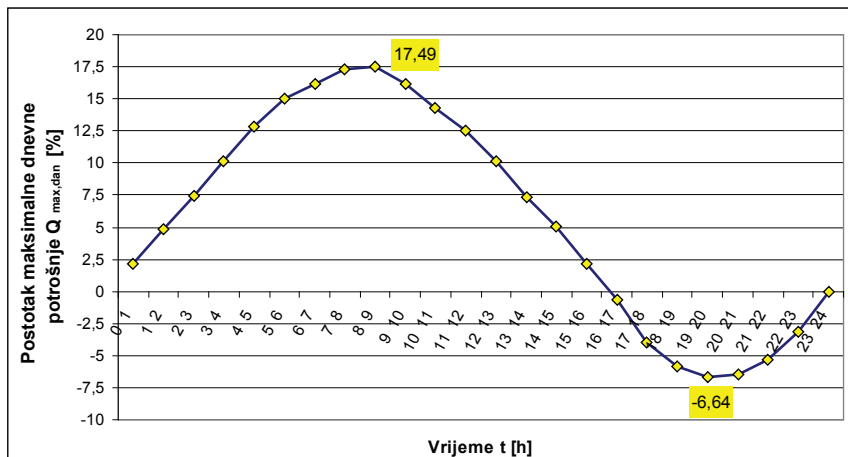


Slika 3. Volumen operativne rezerve vodne komore – oscilacije razine vode u vodnoj komori za RURALNO NASELJE za slučaj gravitacijskog dotoka vode u vodospremu

Primjer 2 - Proračun potrebne operativne rezerve za slučaj manjeg grada sa industrijom uz gravitacijski dotok u VK. Maksimalna satna potrošnja vode uvedena je u stupcu 2 u Tablici 2. i znatno se razlikuje u odnosu na maksimalnu satnu potrošnju ruralnog naselja. Kako se radi o manjem naselju sa industrijom poželjno je da industrija radi noću kada je električna energija najjeftinija. Upravo iz tih razloga su u stupcu 2 Tablice 2. stavljene određene satne potrošnje u noćnim satima, dok satna potrošnja u toku dana postepeno raste do određenog maksimuma i onda počinje opadati (nema znatnijih ekstrema, satna potrošnja je ravnomjernija u odnosu na potrošnju vode ruralnog naselja ili manjeg naselja bez industrije). Na identičan način kao i u prvom primjeru, određen je višak dotoka vode u VK i manjak satne potrošnje koji iznosi 24,13 % maksimalne dnevne potrošnje vode. U stupcu 6 Tablice 2. može se uočiti da u toku dana postoje samo dva karakteristična ekstrema (Slika 4.), pa je ukupan potreban operativan volumen VK vodospreme jednak $V_{RO} = 17,49 + 6,64 = 24,13 \% Q_{max,dan} m^3$.

Tablica 2. *Primjer 2 – MANJE NASELJE SA INDUSTRIJOM – gravitacijski dotok*

Sati od - do	Satna potrošnja % $Q_{max,dan}$	Dotok u VK % $Q_{max,dan}$	Višak dotoka % $Q_{max,dan}$	Manjak satne potrošnje % $Q_{max,dan}$	Operativni volumen VK % $Q_{max,dan}$
1	2	3	4	5	6
0 - 1	2	4,16	2,16		2,16
1 - 2	1,5	4,16	2,66		4,82
2 - 3	1,5	4,16	2,66		7,48
3 - 4	1,5	4,16	2,66		10,14
4 - 5	1,5	4,17	2,67		12,81
5 - 6	2	4,17	2,17		14,98
6 - 7	3	4,17	1,17		16,15
7 - 8	3	4,17	1,17		17,32
8 - 9	4	4,17	0,17		17,49
9 - 10	5,5	4,17		1,33	16,16
10 - 11	6	4,17		1,83	14,33
11 - 12	6	4,17		1,83	12,5
12 - 13	6,5	4,17		2,33	10,17
13 - 14	7	4,17		2,83	7,34
14 - 15	6,5	4,17		2,33	5,01
15 - 16	7	4,17		2,83	2,18
16 - 17	7	4,17		2,83	-0,65
17 - 18	7,5	4,17		3,33	-3,98
18 - 19	6	4,17		1,83	-5,81
19 - 20	5	4,17		0,83	-6,64
20 - 21	4	4,16	0,16		-6,48
21 - 22	3	4,16	1,16		-5,32
22 - 23	2	4,16	2,16		-3,16
23 - 24	1	4,16	3,16		0,00
Ukupno	100%	100%	24,13%	24,13%	24,13%



Slika 4. Volumen operativne rezerve vodne komore – oscilacije razine vode u vodnoj komori za MANJI GRAD SA INDUSTRIJOM za slučaj gravitacijskog dotoka vode u vodospremu

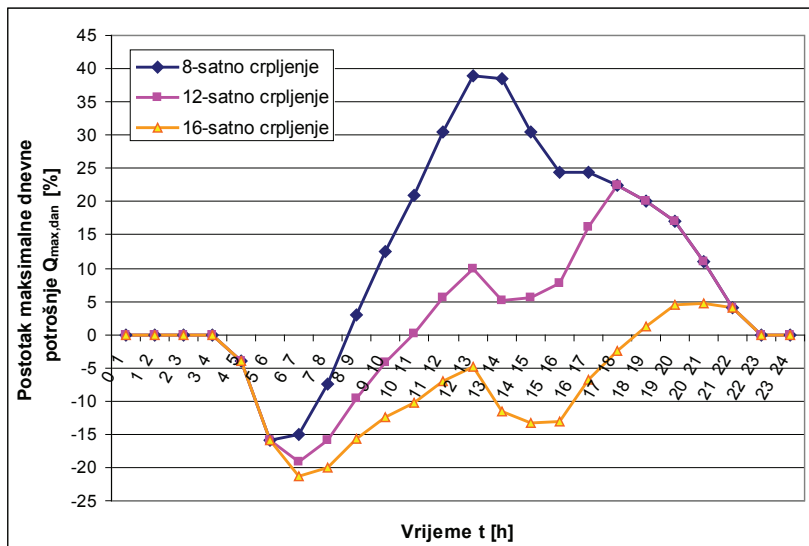
Primjer 3 – Proračun potrebnog operativnog volumena vodne komore za slučaj vodoopskrbe ruralnog naselja uz potisni (tlačni) dotoka vode u vodospremu i to za kontinuirano 8-satno, 12-satno i 16-satno prepumpavanje, Tablica 3, Slika 5. Satne potrošnje ruralnog naselja usvojene su kao i kod Primjera 1., dok se 8-satno punjenje VK vrši u periodu od 6-14 sati. Dotok u VK crpljenjem iznosi 12,5 % $Q_{max,dan}$ u periodu jednog sata. Do 6 sati u VK se stvara manjak od 16 % $Q_{max,dan}$, koji se u narednih 8 sati počinje polako smanjivati (opadanje razine vode u VK), da bi u periodu između 8 i 9 sati volumen vode u VK pao na vrijednost 0 % $Q_{max,dan}$. Od tog trenutka VK se počinje puniti (prirast razine vode), da bi u periodu od 13 do 14 sati postigla maksimalnu vrijednost dnevne potrošnje. Do kraja dana razina vode u VK opada na 0 % $Q_{max,dan}$, pošto je satna potrošnja vode veća u odnosu na dotok vode u VK. Ukupan volumen operativne rezerve VK u Primjeru 3. iznosi $V_{RO}=16+39=55$ % $Q_{max,dan}$ [m³].

U slučaju 12-satnog crpljenja, pri istim satnim potrošnjama ruralnog naselja potreban volumen operativne rezerve VK smanjio se na vrijednost 41,7 % $Q_{max,dan}$ ili nešto manje od 13,4 % u odnosu na prvi slučaj 8-satnog crpljenja, Slika 5. Daljnim proračunom za 16-satno crpljenje vrijednosti potrebnog volumena operativne rezerve VK dodatno se smanjuju. Konkretno, za kontinuirani dotok crpljenjem od 16 sati (u periodu od 6-22 sata), potreban volumen operativne rezerve VK iznosi 26,0 % $Q_{max,dan}$, Slika 5. Iz provedenog primjera se vidi da se potreban volumen operativne rezerve vodne komore V_{RO} smanjuje, ukoliko se poveća vremenski period crpljenja. Tada su satne razlike između dotoka u VK i istjecanja iz nje mnogo ravnomjernije u odnosu na 8-satni potisni sustav, pa je i

potreban volumen operativne rezerve VK manji. Međutim, potrebno je naglasiti da 16-satno crpljenje vode može povećati pogonske troškove (veći utrošak električne energije za rad crpki) u odnosu na 8 ili 12-satno crpljenje. Druga činjenica je da duži vremenski period rada crpke može naštetiti njenoj djelotvornosti, pa se mogu očekivati česti prekidi rada crpki.

Tablica 3. Primjer 3 – RURALNO NASELJE – dotok crpljenjem

Sati od - do	Maks. satna potrošnja % $Q_{max,dan}$	Dotok u VK crpljenjem % $Q_{max,dan}$			$T_{cr} = 8^h$		$T_{cr} = 12^h$		$T_{cr} = 16^h$		Operativni volumen VK % $Q_{max,dan}$		
					Višak	Manjak	Višak	Manjak	Višak	Manjak	% $Q_{max,dan}$	% $Q_{max,dan}$	% $Q_{max,dan}$
		8 ^h	12 ^h	16 ^h	8 ^h	8 ^h	12 ^h	12 ^h	16 ^h	16 ^h	8 ^h	12 ^h	16 ^h
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0 1	0										0	0	0
1 2	0										0	0	0
2 3	0										0	0	0
3 4	0										0	0	0
4 5	4					4		4		4	-4	-4	-4
5 6	12					12		12		12	-16	-16	-16
6 7	11,5	12,5	8,33	6,25	1		3,17		5,25		-15	-19,17	-21,25
7 8	5	12,5	8,33	6,25	7,5		3,33		1,25		-7,5	-15,84	-20
8 9	2	12,5	8,33	6,25	10,5		6,33		4,25		3	-9,51	-15,75
9 10	3	12,5	8,33	6,25	9,5		5,33		3,25		12,5	-4,18	-12,5
10 11	4	12,5	8,33	6,25	8,5		4,33		2,25		21	0,15	-10,25
11 12	3	12,5	8,33	6,25	9,5		5,33		3,25		30,5	5,48	-7
12 13	4	12,5	8,33	6,25	8,5		4,33		2,25		39	9,81	-4,75
13 14	13	12,5	8,33	6,25		0,5		4,67		6,75	38,5	5,14	-11,5
14 15	8		8,34	6,25		8	0,34			1,75	30,5	5,48	-13,25
15 16	6		8,34	6,25		6	2,34		0,25		24,5	7,82	-13
16 17	0		8,34	6,25			8,34		6,25		24,5	16,16	-6,75
17 18	2		8,34	6,25		2	6,34		4,25		22,5	22,5	-2,5
18 19	2,5			6,25		2,5		2,5	3,75		20	20	1,25
19 20	3			6,25		3		3	3,25		17	17	4,5
20 21	6			6,25		6		6	0,25		11	11	4,75
21 22	7			6,25		7		7		0,75	4	4	4
22 23	4					4		4		4	0	0	0
23 24	0										0	0	0
Ukupno	100%	100%	100%	100%	55%	55%	46,3%	46,3%	34,5%	34,5%	55%	41,7%	26%



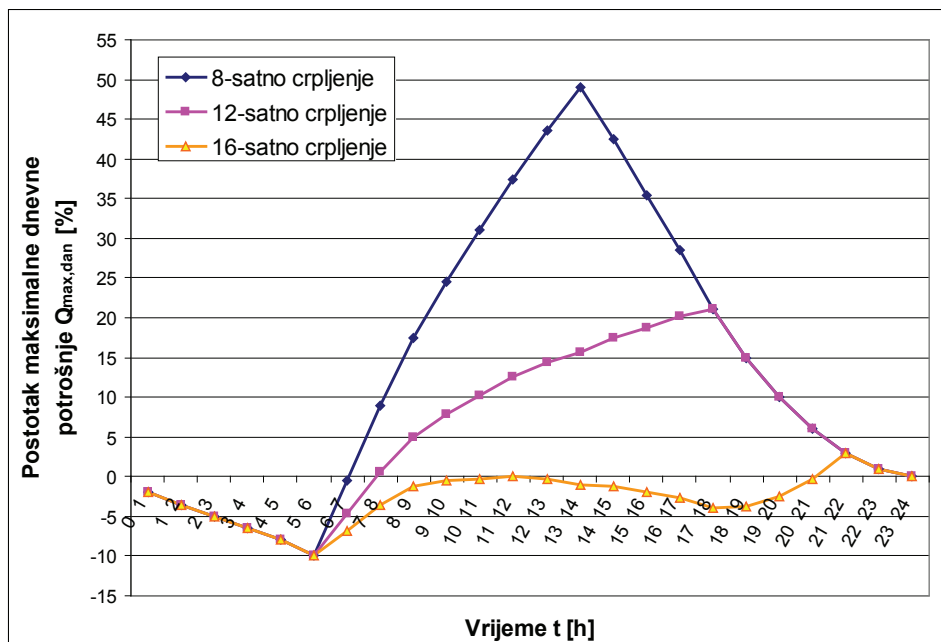
Slika 5. Volumen operativne rezerve vodne komore – oscilacije razine vode u vodnoj komori za RURALNO NASELJE za slučaj 8, 12 i 16-satnog potisnog dotoka vode u vodospremu

Primjer 4 – Proračun potrebnog operativnog volumena vodne komore za slučaj vodoopskrbe manjeg grada sa industrijom uz potisni (tlačni) dotok vode u vodospremu i to za kontinuirano 8-satno, 12-satno i 16-satno prepumpavanje, Tablica 4, Slika 6. U slučaju 8-satnog crpljenja potreban volumen operativne rezerve vodne komore V_{RO} iznosi velikih 59 % $Q_{max,dan}$, kod 12-satnog crpljenja ta vrijednost opada na 31 % $Q_{max,dan}$, dok je potrebni volumen operativne rezerve vodospreme manjeg grada sa industrijom pri 16-satnom crpljenju svega 13 % $Q_{max,dan}$. Važno je napomenuti da se u ovom, kao i u prethodnom primjeru operativni volumen vodne komore može smanjiti ili povećati ovisno o periodu crpljenja u toku dana (jedna, dvije ili tri radne smjene). Ukoliko se dotok crpljenjem (8, 12 ili 16-satno crpljenje) postavi u periodu najvećih satnih potrošnji naselja u toku dana, može se očekivati da će potreban operativni volumen vodne komore biti manji u odnosu na dotok crpljenjem u periodu manje satne potrošnje.

Dotok crpljenjem u periodu velikih dnevnih potrošnji stvara manje razlike između dotoka u vodnu komoru i otjecanja iz nje, pa je samim time i ukupan potreban operativan volumen vodne komore u toku dana manji (time su manje i oscilacije u pogledu radnih tlakova na potrošačkim jedinicama).

Tablica 4. Primjer 4 – MANJE NASELJE SA INDUSTRIJOM – dotok crpljenjem

Sati od - do	Maks. satna potrošnja % $Q_{\max, \text{dan}}$	Dotok u VK crpljenjem % $Q_{\max, \text{dan}}$			$T_{\text{cr}} = 8^{\text{h}}$		$T_{\text{cr}} = 12^{\text{h}}$		$T_{\text{cr}} = 16^{\text{h}}$		Operativni volumen VK % $Q_{\max, \text{dan}}$		
					Višak	Manjak	Višak	Manjak	Višak	Manjak	% $Q_{\max, \text{dan}}$	% $Q_{\max, \text{dan}}$	% $Q_{\max, \text{dan}}$
		8 ^h	12 ^h	16 ^h	8 ^h	8 ^h	12 ^h	12 ^h	16 ^h	16 ^h	8 ^h	12 ^h	16 ^h
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0 1	2					2		2		2	-2	-2	-2
1 2	1,5					1,5		1,5		1,5	-3,5	-3,5	-3,5
2 3	1,5					1,5		1,5		1,5	-5	-5	-5
3 4	1,5					1,5		1,5		1,5	-6,5	-6,5	-6,5
4 5	1,5					1,5		1,5		1,5	-8	-8	-8
5 6	2					2		2		2	-10	-10	-10
6 7	3	12,5	8,33	6,25	9,5		5,33		3,25		-0,5	-4,67	-6,75
7 8	3	12,5	8,33	6,25	9,5		5,33		3,25		9	0,66	-3,5
8 9	4	12,5	8,33	6,25	8,5		4,33		2,25		17,5	4,99	-1,25
9 10	5,5	12,5	8,33	6,25	7		2,83		0,75		24,5	7,82	-0,5
10 11	6	12,5	8,33	6,25	6,5		2,33		0,25		31	10,15	-0,25
11 12	6	12,5	8,33	6,25	6,5		2,33		0,25		37,5	12,48	0
12 13	6,5	12,5	8,33	6,25	6		1,83			0,25	43,5	14,31	-0,25
13 14	7	12,5	8,33	6,25	5,5		1,33			0,75	49	15,64	-1
14 15	6,5		8,34	6,25		6,5	1,84			0,25	42,5	17,48	-1,25
15 16	7		8,34	6,25		7	1,34			0,75	35,5	18,82	-2
16 17	7		8,34	6,25		7	1,34			0,75	28,5	20,16	-2,75
17 18	7,5		8,34	6,25		7,5	0,84			1,25	21	21	-4
18 19	6			6,25		6		6	0,25		15	15	-3,75
19 20	5			6,25		5		5	1,25		10	10	-2,5
20 21	4			6,25		4		4	2,25		6	6	-0,25
21 22	3			6,25		3		3	3,25		3	3	3
22 23	2					2		2		2	1	1	1
23 24	1					1		1		1	0	0	0
Ukupno	100%	100%	100%	100%	59%	59%	31%	31%	17%	17%	59%	31%	13%



Slika 6. Volumen operativne rezerve vodne komore – oscilacije razine vode u vodnoj komori za MANJI GRAD SA INDUSTRIJOM za slučaj 8, 12 i 16-satnog potisnog dotoka vode u vodospremu

U Tablici 5. je dana analiza određivanja ukupnog volumena V_{UK} vodne komore za slučaj gravitacijskog i potisnog sustava dotoka pitke vode u vodospremu za različite vremenske periode prepumpavanja (različite režime crpljenja). U analizi su određeni i protoci dovodnog i odvodnog cjevovoda [l/s], te dotok vode u vodnu komoru kao određeni postotak maksimalne dnevne potrošnje. Dovodni cjevovod je dimenzioniran na način da propusti potrebnu količinu vode kojom se pune vodne komore, dok je odvodni (distribucijski) cjevovod dimenzioniran na potrebnu količinu vode potrebnu za opskrbu naselja i industrije, te gašenje požara i tlačne probe (stupac 8 u Tablici 5.). Iz provedene analize može se uočiti način na koji se mijenja ukupni volumen vodne komore vodospreme u ovisnosti o jednosmjenskom, dvosmjenskom ili trosmjenskom radu crpke. Stoga je bitno da se kod proračuna vodne komore vodospreme napravi detaljna analiza (više varijanti) ovisnosti dotoka i satne potrošnje u toku jednog dana, kako bi se na što jednostavniji i učinkovitiji način mogla obavljati svakodnevna vodoopskrba naselja i industrije, te kako bi pogonski troškovi bili što manji.

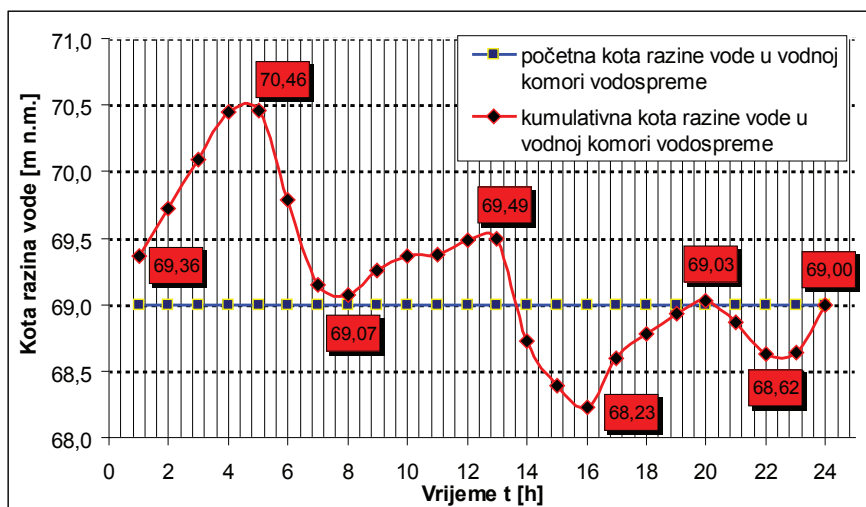
Tablica 5. Ovisnost ukupnog volumena V_{UK} vodne komore o vremenskom rasporedu dotoka vode, tipu naselja i režimu dotoka vode u vodospremu, GD – gravitacijski dotok, TR – tlačni režim, RN – ruralno naselje, VGSI – veći grad sa industrijom, VK – vodna komora

Vremenski raspored dotoka vode u VK vodospreme Od - do (jedno-, dvo- ili trosmjenski rad crpki)	DOVODNI CJEVOVOD Sati dotok u VK p [%] $Q_{max,dan}$	Protočna količina dovodnog cjevovoda $q = Q_{max,dan} * p/100$ [l/s]	ODVODNI CJEVOVOD					Ukupni volumen VK $V_{UK} = V_{RO} + V_{RP} + V_{RS}$ [m ³]
			Postotak dnevne potrošnje P [%] $Q_{max,dan}$	Operativne rez. $V_{RO} = Q_{max,dan} * P/100$ [m ³]	Protupožarna rezerva V_{RP} bez neutralizacije [m ³]	Sigurnosna rezerva V_{RS} [m ³]	Protočna količina odvodnog cjevovoda [l/s]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
GD 24 sata, RN	4,17	12,61	25,63	279,11	72	87,78	61,52	438,89
GD 24 sata, VGSI	4,17	75,36	24,13	1569,90	288	464,48	240,05	2322,38
TR 8 sati (6-14 ^h), RN	12,5	37,81	55	598,95	72	167,74	72,62	838,69
TR 12 sati (6-18 ^h), RN	8,33	25,20	41,7	453,79	72	131,45	67,58	657,23
TR 16 sati (6-22 ^h), RN	6,25	18,91	26	283,14	72	88,79	61,66	443,93
TR 8 sati (10-18 ^h), RN	12,5	37,81	60	653,40	72	181,35	74,51	906,75
TR 12 sati (8-20 ^h), RN	8,33	25,20	49,5	539,06	72	152,76	70,54	763,82
TR 16 sati (2-18 ^h), RN	6,25	18,91	22,5	245,03	72	79,26	60,33	396,28
TR 8 sati (8-12 i 14-18 ^h), RN	12,5	37,81	55	598,95	72	167,74	72,62	838,69
TR 12 sati (8-15 i 17-22 ^h), RN	8,33	25,20	36,5	397,49	72	117,37	65,63	586,86
TR 16 sati (2-10 i 14-22 ^h), RN	6,25	18,91	28	304,92	72	94,23	62,41	471,15
TR 8 sati (6-14 ^h), VGSI	12,5	225,9	59	3838,55	288	1031,64	318,82	5158,19
TR 12 sati (6-18 ^h), VGSI	8,33	150,5	31	2016,87	288	576,22	255,57	2881,08
TR 16 sati (6-22 ^h), VGSI	6,25	113,0	13	910,84	288	299,71	217,17	1498,55
TR 8 sati (8-10 i 14-20 ^h), VGSI	12,5	225,9	36	2342,17	288	657,54	266,87	3287,71
TR 12 sati (4-12 i 15-19 ^h), VGSI	8,33	150,5	35,68	2321,35	288	652,34	266,14	3261,69
TR 16 sati (2-12 i 15-21 ^h), VGSI	6,25	113,0	28,5	1854,22	288	535,55	249,92	2677,77
TR 8 sati (2-5, 7-10, 14-16 ^h), VGSI	12,5	225,9	53	3448,19	288	934,05	305,27	4670,24
TR 12 sati (1-7, 8-10, 15-19 ^h), VGSI	8,33	150,5	43,16	2808,00	288	774,00	283,04	3870,00
TR 16 sati (1-10, 11-15, 17-20 ^h), VGSI	6,25	113,0	32,75	2130,72	288	604,68	259,53	3023,40

4. Utjecaj oscilacija vodnih masa u vodospremi na gubitke u gravitacijskom vodoopskrbnom sustavu

U nastavku je opisan i grafički prezentiran utjecaj oscilacija vodnih masa u vodospremi (prekidnim komorama) na radne tlakove i linijske gubitke kod pojedinih potrošača unutar vodoopskrbnog sustava na dva karakteristična primjera. Prvi primjer je vezan za određivanje radnih tlakova i linijskih gubitaka kod ruralnog naselja pri gravitacijskom dotoku vode prema potrošačkim jedinicama (Slika 1.), dok se u drugom primjeru pobliže određuju promjene radnih tlakova i linijskih gubitaka na manjem naselju sa industrijom kod gravitacijskog dotoka vode prema potrošačkim jedinicama, Slika 2.

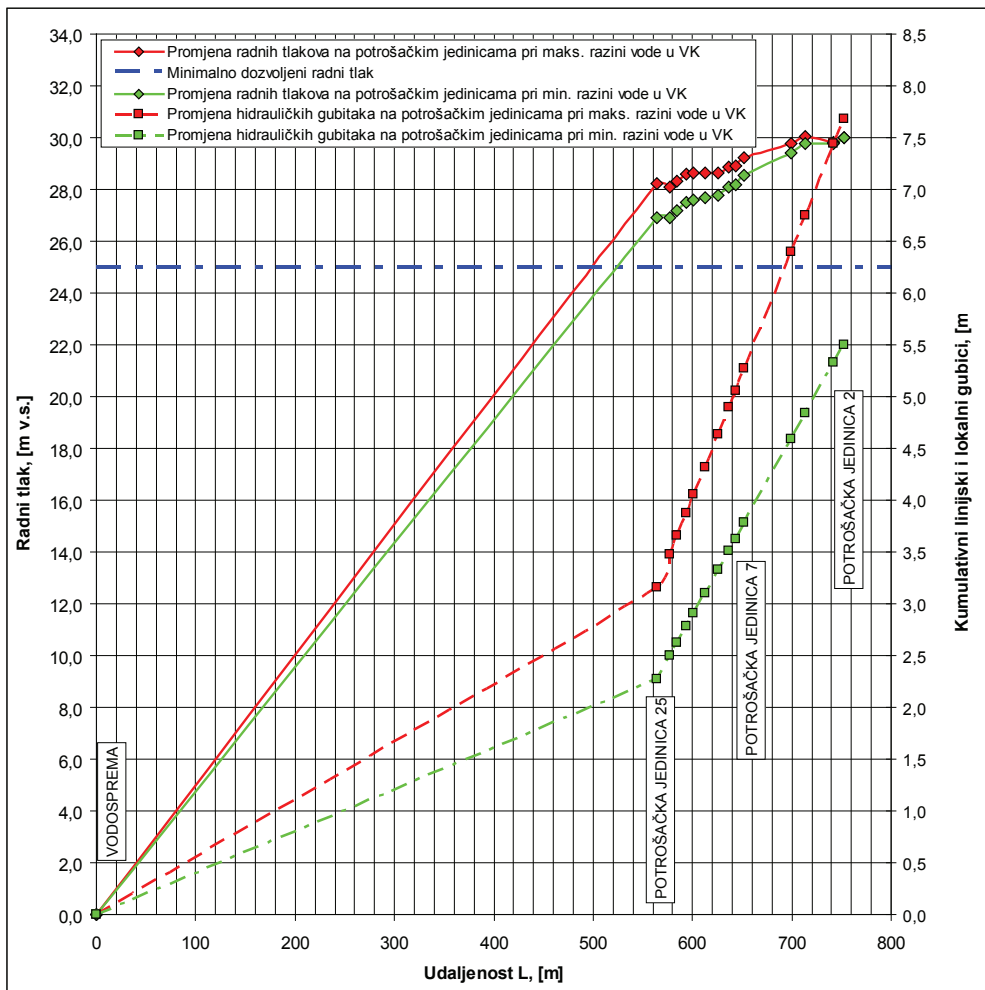
Na temelju hidrauličkog proračuna vodoopskrbne mreže određeno je da ukupna maksimalna dnevna potrošnja vode za opskrbu ruralnog naselja iznosi $1089 \text{ m}^3/\text{dan}$. Iz proračuna operativne, sigurnosne i protupožarne rezerve pokazalo se da ukupni volumen vodne komore vodospreme iznosi $438,89 \text{ m}^3$, Tablica 5. Međutim, zbog naglog širenja seoskog turizma i mogućnosti opskrbe pitkom vodom okolnih zaseoka VK vodospreme je dimenzionirana na ukupni volumen od 1000 m^3 sa tlocrtnom površinom dimenzija $12,5 \times 10 \text{ m} = 125 \text{ m}^2$. Uobičajena dubina vode u vodospremi volumena od 500 do 2000 m^3 treba iznositi $5 \div 6 \text{ m}$. Dodatno je usvojeno da na kraju dana u vodnoj komori preostaje 250 m^3 pitke vode (početni volumen u VK), što u konačnici daje početnu razinu vode u VK vodospreme od 69 mn.m. , Slika 7.



Slika 7. Prikaz promjena razina vode u vodnoj komori vodospreme, RURALNO NASELJE

Sa grafičkog prikaza na Slici 7. određene su vrijednosti maksimalne (70,46 mn.m.) i minimalne (68,23 mn.m.) razine vode u VK vodospreme za ruralno naselje, koje će biti osnovni preduvjeti za dobivanje mjerodavnih radnih tlakova i ukupnih hidrauličkih gubitaka na pojedinim potrošačkim jedinicama unutar vodoopskrbne mreže. Prethodno je potrebno poznavati kote terena svake potrošačke jedinice u vodoopskrbnom sustavu, duljine pojedinih dionica između potrošačkih jedinica, tip pojedine potrošačke jedinice i njezinu potrošnju kako bi se u konačnici mogli odrediti ukupni gubici tečenja i radni tlakovi.

Na slici 8. prikazane su promjene radnih tlakova i hidrauličkih gubitaka na potrošačkim jedinicama ruralnog naselja pri maksimalnoj i minimalnoj razini vode



Slika 8. Promjene radnih tlakova i hidrauličkih gubitaka na potrošačkim jedinicama pri maksimalnoj i minimalnoj razini vode u vodnoj komori vodospreme – RURALNO NASELJE

u VK. Može se uočiti da se zbog znatnijih dnevnih oscilacija razine vode u VK mijenjaju i radni tlakovi koji ne smiju prekoračiti dozvoljene (normirane) granice propisane za pojedinu cijev i materijal od kojeg je izgrađen vodoopskrbni sustav. Sa slike 8. je vidljivo da se pri maksimalnoj razini vode u VK radni tlakovi od potrošačke jedinice 25 do krajnjeg potrošača 2 povećavaju od vrijednosti 28,25 do 30,0 m v.s.. Pritom se ukupni hidraulički gubici na promatranom vodoopskrbnom sustavu ruralnog naselja povećavaju od vrijednosti 0 m na VK do maksimalne vrijednosti od 7,68 m na krajnjoj potrošačkoj jedinici 2. Kod maksimalne razine vode u vodnoj komori koja se može pojaviti i više puta tokom dana, stvaraju se maksimalni radni tlakovi na potrošačkim jedinicama koji dugoročno mogu izazvati oštećenja na vodovima ili pucanje cijevi zbog pojave naprezanja većih od dozvoljenih. Kako gore navedenih problema ne bi bilo u vodoopskrbne sustave se ugrađuju reducir-ventili [4], [6]. Veća razina vode u VK također povećava brzine strujanja vode u cijevnim vodovima, što na temelju Darcy-Weisbachovog izraza:

$$\Delta H_{lin.} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

rezultira povećanjem linijskih gubitaka $\Delta H_{lin.}$. Pojedine oznake u (1) predstavljaju linijski koeficijent trenja λ , duljinu cijevi na kojoj se promatraju linijski gubici L , promjer cijevi D , te brzinu strujanja vode v .

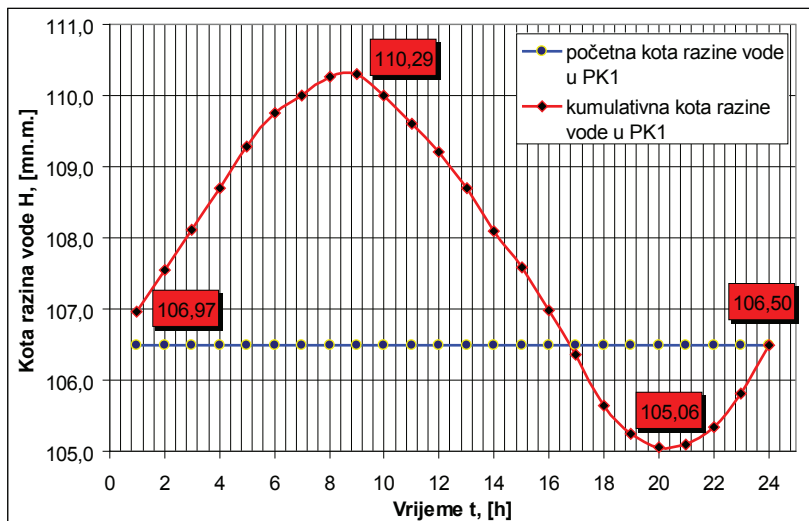
Ukoliko vodoopskrbni sustav ima veliki broj ugrađenih ventila, koljena, račvi ili sličnih fazonskih komada mogu se očekivati i znatniji lokalni gubici.

S druge strane, pri najnižim razinama vode u vodospremi radni tlakovi na potrošačkim jedinicama poprimaju minimalnu vrijednost, te dolazi do problema nezadovoljavanja minimalnih potrebnih radnih tlakova unutar vodoopskrbne mreže (potrebnih 25 m v.s.). Posljedice toga su vrlo slaba istjecanja na izljevnim mjestima (ljetni period u godini), odnosno nedostatan protok na potrošačkim jedinicama. Za konkretni slučaj vodoopskrbe ruralnog naselja promjene radnih tlakova pri minimalnoj razini vode u VK tokom dana se kreću u granicama od 26,92 m v.s. na najuzvodnijoj potrošačkoj jedinici 25 do vrijednosti 29,7 m v.s. na krajnjoj potrošačkoj jedinici 2. Može se uočiti da je radni tlak na najuzvodnijem potrošaču 25 tek nešto veći od minimalno dozvoljenog radnog tlaka u vodoopskrbnim sustavima. Ukupni hidraulički gubici pri minimalnoj razini vode u VK iznose 5,50 m, što predstavlja značajan pad u odnosu na gubitke uslijed tečenja pri maksimalnoj razini vode u VK. Važno je napomenuti da se pri hidrauličkom proračunu tečenja u vodoopskrbnom sustavu ruralnog naselja uzimao kinematički koeficijent viskoznosti ν sa vrijednošću $1,308 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, apsolutna hrapavost plastičnih cijevi ϵ iznosila je 0,1 mm, dok je koeficijent lokalnog gubitka na ulazu u cijevni vod uzet sa vrijednošću 0,05.

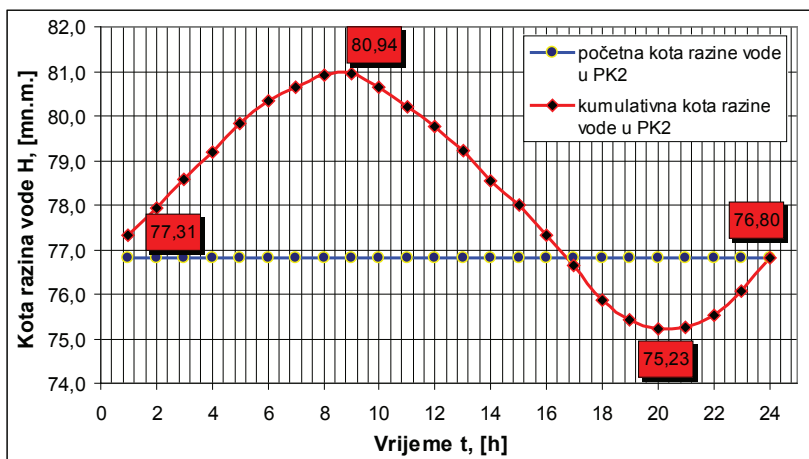
Sa priložene Slike 8. može se konstatirati da se uslijed promjene razine vode u vodnoj komori s maksimalne na minimalnu, radni tlak na mjestu potrošačke jedinice 25 smanjuje za 0,133 bara što u konačnici može predstavljati značajni pad tlaka. Idući prema nizvodnijim potrošačkim jedinicama, promjene radnih tlakova i hidrauličkih gubitaka uzrokovanih maksimalnim i minimalnim razinama vode u VK postaju sve izraženije. Razlog tomu je povećanje ukupne duljine vodoopskrbnih cjevovoda idući od vodospreme prema krajnjim potrošačkim jedinicama, odnosno kumulativni prirast linijskih i lokalnih gubitaka na cijevnim vodovima. Konkretno, za slučaj opskrbe vode ruralnog naselja od VK do najnižvodnije potrošačke jedinice 2 (u dužini od 752,36 m) razlike ukupnih hidrauličkih gubitaka pri maksimalnoj i minimalnoj razini vode iznose 0,89 m (na najuzvodnijoj potrošačkoj jedinici 25), 1,38 m (potrošačka jedinica 11), odnosno 2,17 m na najnižvodnijoj potrošačkoj jedinici 2. Stoga je poželjno da se na vodoopskrbnom sustavu u toku jednog dana napravi jedan pregledan sustav ili program koji će dati grafički ili analitički prikaz promjene radnih tlakova na pojedinim potrošačkim jedinicama u ovisnosti o razini vode u vodnoj komori tokom dana. Paralelno s time, a poznavajući isporučenu količinu pitke vode može se promatrati ukupne hidrauličke gubitke (linijske i lokalne) unutar vodoopskrbnog sustava, odnosno hidrauličke gubitke između pojedinih potrošačkih jedinica. Kod vodoopskrbnog sustava ukupni hidraulički gubici se sastoje pretežitim dijelom od linijskih gubitaka uzrokovanih trenjem, odnosno hrapavošću stjenke materijala od kojeg su vodoopskrbne cijevi izgrađene. Na temelju promatranja cjelokupnog ili pojedinačnog dijela vodoopskrbnog sustava kroz jedan duži vremenski period, mogu se na temelju jednakih isporučenih količina vode uočiti manje ili veće razlike radnog tlaka na potrošačkim jedinicama. Veće promjene radnog tlaka (niski radni tlak na mjestu potrošnje) pri istim količinama vode rezultiraju povećanjem gubitaka koji mogu biti dvojaki. U prvom slučaju, vijek trajanja cijevi (starost cijevi) može povećati hrapavost stjenki i rezultirati povećanjem linijskih gubitaka. U drugom slučaju dolazi do mjestimičnog pucanja cijevi u vidu pukotina ili manjih rupica na kojima pitka voda istječe i rezultira smanjenjem razine vode u vodnoj komori vodospreme, odnosno smanjenjem radnog tlaka na potrošačkoj jedinici. Veći radni tlakovi u cijevima na istu površinu nastale pukotine rezultiraju većim gubicima u vidu istjecanja vode, odnosno većim gubicima u količini pitke vode unutar vodoopskrbnog sustava.

U drugom primjeru se promatraju promjene radnih tlakova i hidrauličkih gubitaka na manjem naselju sa industrijom, Slika 2. Na temelju ukupnog potrebnog dnevnog dotoka $Q_{max,dan} = 6506 \text{ m}^3/dan$ izvršeno je dimenzioniranje vodne komore vodospreme i dviju prekidnih komora PK1 i PK2. Ukupan volumen VK i prekidne komore PK1 iznosi 2000 m^3 , dok je volumen prekidne komore PK2 1500 m^3 . Tlocrtne površine VK i PK1 iznose $15 \cdot 20 = 300 \text{ m}^2$, dok PK2 ima tlocrtnu površinu

od $12,5 \cdot 20 = 250 \text{ m}^2$. Na temelju hidrauličkog proračuna oscilacija vodnih masa u vodnoj komori vodospreme i prekidnim komorama PK1 i PK2 određene su maksimalne i minimalne razine vode u njima, Slika 9.a) i b).



a)

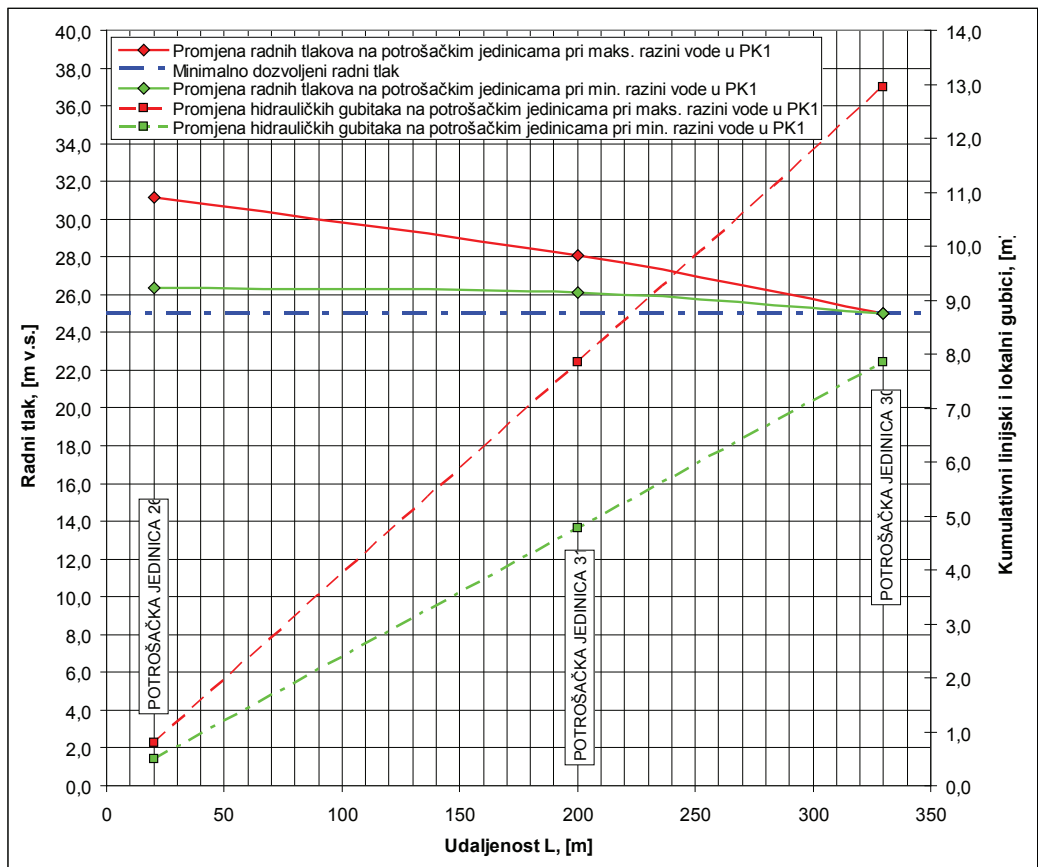


b)

Slika 9. a) Prikaz dnevne oscilacije vodnih masa u prekidnoj komori PK1,
b) prikaz dnevne oscilacije vodnih masa u prekidnoj komori PK2,
MANJE NASELJE SA INDUSTRIJOM

Kao što se vidi na shematskom prikazu sa Slike 2. između glavne vodospreme i PK1 nema potrošačkih jedinica, te se proračun određivanja radnih tlakova i hidrauličkih gubitaka na potrošačkim jedinicama računa od razina vode u PK1 i

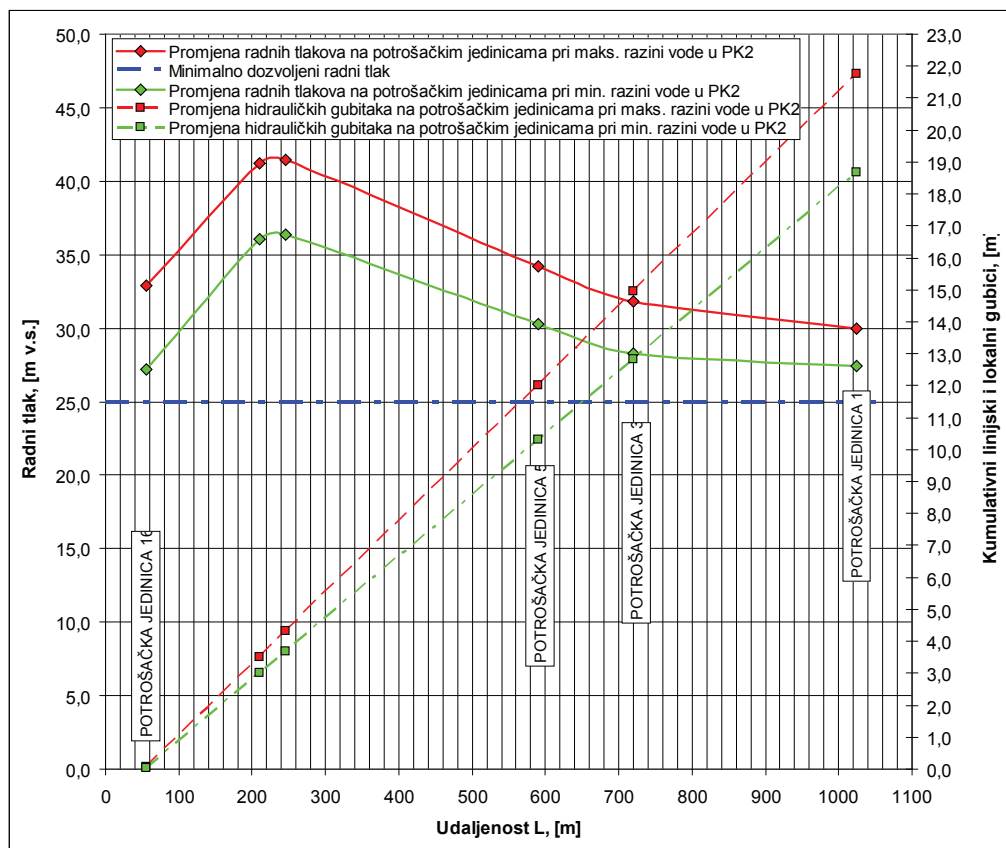
PK2 zasebno. Maksimalna razina vode u PK1 iznosi 110,29 mn.m., a minimalna 105,06 mn.m, dok je vrijednost maksimalne razine vode u PK2 80,94 mn.m., a minimalna 75,23 mn.m, Slika 9.a) i b). Na slikama 10. i 11. grafički su prikazane promjene radnih tlakova i ukupnih hidrauličkih gubitaka na potrošačkim jedinicama uvjetovanih promjenama maksimalne i minimalne razine vode u prekidnim komorama PK1 i PK2. Pri hidrauličkom proračunu tečenja vode vrijednost kinematičkog koeficijenta viskoznosti ν je iznosila $1,308 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, apsolutna hrpavost vodoopskrbnih cijevi ϵ uzeta je sa 1,5 mm, dok je koeficijent lokalnog gubitka na izlazu iz prekidnih komora iznosio 0,05.



Slika 10. Promjena radnih tlakova i hidrauličkih gubitaka na potrošačkim jedinicama pri maksimalnoj i minimalnoj razini vode u PK1 – MANJE NASELJE SA INDUSTRIJOM

Kod manjeg naselja sa industrijom se zbog povećanog maksimalnog dnevnog dotoka vode $Q_{max,dan}$ u VK vodospreme javljaju i veće dnevne oscilacije razina vode. Za očekivati je da će pri tome i dnevne promjene radnih tlakova na

potrošačkim jedinicama biti značajnije u odnosu na tip ruralnog naselja. Međutim, kote terena na kojima se nalaze pojedine potrošačke jedinice mogu dovesti do slučaja da se idući prema krajnjim potrošačkim jedinicama radni tlakovi smanjuju (Slika 10.) ili da pak variraju idući prema najudaljenijim potrošačkim jedinicama vodoopskrbne mreže (Slika 11.) u ovisnosti o prirastu ukupnih hidrauličkih gubitaka. Dakako, na to imaju utjecaj promjene razine voda u vodnoj komori koje utječu na prirast ili pad brzina tečenja u cijevima. Sa slike 10. se može uočiti da se radni tlak na najuzvodnijoj potrošačkoj jedinici 26 promijenio za gotovo 0,478 bara pri maksimalnoj dnevnoj promjeni razine vode u PK1. Smanjenje razine vode u PK1 na minimalnu vrijednost rezultiralo je smanjenjem ukupnih linijskih gubitaka na potrošačkoj jedinici 30 za gotovo 5,1 m, Slika 10.



Slika 11. Promjena radnih tlakova i hidrauličkih gubitaka na potrošačkim jedinicama pri maksimalnoj i minimalnoj razini vode u PK2 – MANJE NASELJE SA INDUSTRIJOM

Usporedimo li grafičke prikaze dnevnih promjena radnih tlakova i ukupnih hidrauličkih gubitaka za ruralno naselje i manje naselje sa industrijom možemo

zaključiti da su te promjene kod naselja sa većom populacijom stanovništva i većim brojem potrošačkih jedinica značajnije. Iz tih razloga bi se kod složenijih vodoopskrbnih sustava trebalo više pozornosti posvetiti hidrauličkoj analizi oscilacija vodnih masa u vodnim komorama i njihovom utjecaju na hidrauličke parametre (brzine u cijevima, protok, radni tlak, linijski i lokalni gubici i sl.) kako ne bi došlo do neželjenih posljedica povećanja ukupnih gubitaka ili pucanja vodoopskrbnih cijevi.

5. Zaključak

Na osnovi provedene hidrauličke analize utjecaja oscilacija vodnih masa na promjene radnih tlakova i ukupne hidrauličke gubitke na pojedinim potrošačkim jedinicama vodoopskrbnog sustava ruralnog naselja i manjeg naselja sa industrijom mogu se dati sljedeće okvirne preporuke i smjernice za potrebe održavanja vodoopskrbnih sustava:

1. potrebno je tokom eksploatacijskog perioda vodoopskrbnog sustava kontinuirano vršiti detaljne analize oscilacija vodnih masa u vodospremi i posljedično s time promjene radnih tlakova na potrošačkim jedinicama, kako bi se na vrijeme uočila prekoračenja (maksimalnih) nedozvoljenih naprezanja vodoopskrbnih cijevi,
2. voditi računa o eksploatacijskom periodu vodoopskrbnog sustava, jer se ovisno o starosti cijevi mijenja i debljina (visina) hrapavosti stjenke koja uzrokuje povećane linijske gubitke u sustavu, a time i povećane ukupne hidrauličke gubitke,
3. ukoliko se na temelju detaljne analize uoče znatnije promjene radnih tlakova pri istim isporučanim količinama pitke vode, treba kratkotrajno obustaviti opskrbu vodom, te u što kraćem vremenskom periodu sprovesti tlačnu probu i sanirati dionice ili mjesta na kojima su se pojavili znatniji gubici vode,
4. vršiti analize promjene radnih tlakova tokom zimskog i ljetnog perioda, kada zbog značajnijih promjena u temperaturi vode dolazi do promjena u vrijednosti koeficijenta kinematičke viskoznosti ν , a posljedično s time i do promjena radnih tlakova i ukupnih hidrauličkih gubitaka.

Sigurnost i pouzdanost količina i kakvoće pitke vode u vodoopskrbnim sustavima ovise o brizi komunalnih poduzeća, odnosno njihovom kontinuiranom praćenju rada vodoopskrbnog sustava, pravovremenom otkrivanju problema i brzom intervenciji u cilju otklanjanja istih. Jedino takvim upornim radom svih komunalnih i vodogospodarskih djelatnika može se postići bolja kvaliteta i veća

pouzdanost vodoopskrbnih sustava, koje uključuje smanjenje ukupnih gubitaka u sustavu uz veću sigurnost ljudi, imovine i okoliša.

Literatura

- [1] J. Margeta. *Opskrba vodom, I dio – sistemi i količine*. Građevinski fakultet Split, Split, 1985.
- [2] I. Gulić. *Opskrba vodom*. Sveučilišni udžbenik, DGHI, Zagreb, 2000.
- [3] H. Raus. *Tehnička hidraulika*. Građevinska knjiga Beograd, Beograd, 1969.
- [4] Ž. Vuković. *Osnove hidrotehnike*. Akvamarine, Zagreb, 1995.
- [5] M. Jahić. *Snabdevanje vodom i zaštita voda*. Udruženje za tehnologiju vode, Beograd, 1984.
- [6] I.I. Agroskin. *Hidraulika*. Tehnička knjiga Zagreb, Zagreb, 1973.
- [7] D. Obradović. Modelling of demand and losses in real-life water distribution systems. *Urban Water*, 2: 131-139, 2000.
- [8] I. Eker, T. Kara. Operation and control of a water supply system. *ISA Transactions*, 42: 461–473, 2003.

Indoor radon concentration measurement in municipality of Bihać

Mjerenje koncentracije unutarnjeg radona u općini Bihać

Bećo Pehlivanović*, Feriz Adrović**, Iva Šarić***, Boris Podobnik***

Sažetak. U ovom radu predstavljeni su rezultati unutarnjeg mjerenja koncentracije radona u području općine Bihać. Rezultati su pokazali da je srednja vrijednost koncentracije aktivnosti radona $82,1 \text{ Bq/m}^3$. Ovaj rezultat vodi do procijenjene godišnje doze od $1,65 \text{ mSv/y}$. Postoje lokaliteti na području općine Bihać sa visokom unutarnjom koncentracijom aktivnosti radona (preko 150 Bq/m^3) što proizlazi iz činjenice da je cijela dolina Bihaća smještena na sedimentnim stijenama, koje su porozne strukture, a većina kuća je izgrađena građevnim materijalom proizvedenim od sedimentnih stijena.

Ključne riječi: radon, općina Bihać, unutarnja koncentracija radona, procijenjena godišnja doza

Abstract. The results of indoor radon concentration survey in the area of the municipality of Bihać are presented. The results showed the average indoor radon activity concentration value of 82.1 Bq/m^3 . This result leads to the annual dose estimate of 1.65 mSv/y . There are localities in the municipality of Bihać with high concentration of indoor radon activity (above 150 Bq/m^3) due to the fact that whole Bihać valley is situated on sediment rocks, which are of porous structure, and the most of the houses are built by the construction material manufactured from sediment rocks.

Key words: Radon, Bihać, indoor radon concentrations, annual dose estimate, high environmental radioactivity

* University of Bihać, Pedagogical faculty, Department of mathematics and physics, Džanića Mahala 36, 77000 Bihać, E-mail: pbeco@hotmail.com

** University of Tuzla, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Univerziteteska 4, 75000 Tuzla

*** Faculty of Civil Engineering, University of Rijeka, Viktora Cara Emina 5, 51000 Rijeka, E-mail: iva.saric@gradri.hr, bp@phy.hr

1 Introduction

Radon is a naturally occurring radioactive gas. It is colourless, odourless and tasteless. This makes radon practically invisible i.e. difficult to detect in space without special instruments. Many distinguishable international scientific organizations marked radon as carcinogenic substance; in particular the International Commission on Radiological Protection (ICRP, 1993) and the US Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR IV, 1988). Radon is the second leading cause of lung cancer for smokers and the leading cause of lung cancer for non-smokers. As chemically inert gas, radon is easily emanated from the soil, construction material or water into the atmosphere.

Radon is a radioactive daughter of ^{238}U which decays to ^{226}Ra . Radon emanates from the soil and enters the air and continues to emanate into atmosphere. Since we breathe the air, we breathe the radioactive gas radon. The higher the concentration of radon in the air, the more we breathe in radioactive radon into lungs. Radon is an alpha emitter decaying to short lived daughters ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi and ^{214}Po .

This decay emits the energy that can devastate the tissue of respiratory tract (ICRP, 1994). The short lived radon daughters present the greater risk for human health than radon itself since metal atoms of polonium are found in (+) ionic form are attached to tiny particles of aerosols which, when inhaled, are deposited in the lungs and then emit alpha particles which ionize lung tissue.

Radon concentration is the highest in minerals, and 25% less is found in the soil, and significantly less, about 1000 less is in indoor air, then outdoor air the smallest concentration is in ocean air. The concentration of indoor radon mostly depends on the number of radium atoms and the ability of radon to emanate into buildings. Consequently, the soil and rocks under or near the dwellings are the primary source of indoor radon. The second source of indoor radon is construction material. Contribution sources like underground waters, natural gases and outdoor air are not significant.

Since radon is the radioactive daughter of ^{238}U , it is expected to find the highest concentration of radon in places with rocks rich in ^{238}U . However, the high concentration of radon activity can be expected in the areas with porous soil. The researches showed that most of the area of the Bihać municipality is situated on porous sediment rocks, probably originated from an ancient lake, known as "bihacit" and used in the manufacturing of construction material (Čremošnik, 1958). Such porous soil can result in the high concentration of radon activity, both from the soil and the construction material.

2 Materials and methods

The measurement of the activity of indoor radon is done by the nuclear track detectors method. For the first time the method of indoor radon concentration measurement by nuclear track detectors is used in Bosnia and Herzegovina. Indoor radon concentration measurement method by nuclear track detectors is one of the most popular methods used for integral indoor radon concentration measurement. Nuclear track detectors are passive detectors, what means that radon independently diffuses into detect diffusion chamber. The passage of heavily ionizing, nuclear particles creates narrow paths of intense damage at an atomic scale. The penetration of alpha particles breaks polymer chains of plastic film leaving detectable damage on it (traces).

Observing these traces and counting them after certain time period we can measure the concentration of radon in a closed system. The traces left by alpha particles are rather small (therefore called latent traces). They are relatively stable on room temperature, but stability depends on type of material film is made from and on the intensity of ionization. This latent damage on film has radius from 1 to 10 nm (Fleischer et al. 1975) and can be traced by microscope only. After exposure to ionisation the films are chemically treated by acid (HF or HNO₃) or alkaline dissolution (NaOH, KOH). In this way broken polymeric chains are diluted and latent damage is exaggerated by factor 10²-10³ which are traceable by optical microscope.

In the period from November 2006 to February 2007 around 100 locations were chosen for measurement by means of CR-39 track detectors which are used in indoor radon concentration measurement. We used detectors made of poly-allyldiglycol-carbonate with dimensions 10 x 10 x 1 mm and sensitivity to alpha particle tracks of 2.9 tracks per m⁻³. These detectors were mounted inside small diffusion chambers of plastic with such dimensions of pores to prevent the entrance of radon decay products and thoron, ²²⁰Rn. The exposure time was 90 days at selected locations. During selection special attention was given to even distribution of dosimeters at the highest possible rate of objects at the specific area of localities in the municipality of Bihać.

We took special care to put dosimeters immediately in order to prevent the increase of radon fluctuations. We selected 20 locations where we put dosimeters in two to five houses randomly chosen according to the size of the location. Since the city of Bihać is the largest settlement in the area we mounted 25 dosimeters. We took special care in selecting the place of mounting i.e. not to put dosimeters near humidity and high temperature. The occupants of chosen buildings were interviewed with the following questions: the year of building construction, the

number of floors, the type of flooring and walls, is there a basement or not, are occupants smoking in the room with dosimeters etc.

Four dosimeters were mounted in the ground floor, mostly the living room. The tracks were read and processed by Institute Jozef Stefan in Ljubljana, Slovenia by the system for automatic track processing TRACOS.

3 Results

The results of indoor radon concentration measurements by CR-39 in the area of Bihać municipality are given in Table 1. Measurement of concentration of indoor radon is done at 100 locations in 20 settlements of Bihać municipality. The detectors were mounted in the rooms where people spend the most of their time indoors (living room and bedroom), mostly at the first floor and at the height of 150-120 cm above the soil.

Table 1 Statistical data for radon activity concentration in 20 settlements of Bihać municipality

No.	Settlement	No. of measurements	Measurement statistics (Bq/m ³)			
			Geo. Mean	Standard deviation	Min.	Max.
1	Bihać grad	25	88.1	2.3	61	99
2	Čekrljice	4	141.2	1.3	120	167
3	Donja Gata	5	155.1	1.5	151	159
4	Golubić	4	52.0	1.2	32	73
5	Gornja Gata	4	158.7	1.2	154	164
6	Izačić	4	76.6	1.4	67	86
7	KulenVakuf	5	58.2	1.4	44	73
8	Lohovo	3	31.2	1.1	29	33
9	Orašac	4	56.3	1.3	53	59
10	Orljani	4	33.4	1.1	30	37
11	Pokoj	3	88.1	1.1	77	99
12	Pritoka	4	32.7	1.2	29	36
13	Ripač	4	33.9	1.3	31	37
14	Skočaj	3	60.1	1.1	44	76
15	Spahići	5	150.5	1.4	144	157
16	Sokolac	4	51.0	1.2	39	62
17	Turija	4	87.7	1.3	77	98
18	Velika Gata	3	152.4	1.1	144	161
19	Založje	4	160.6	1.1	159	162
20	Zavalje	4	53.1	1.3	39	62

4 Discussion

Measured concentrations of radon activities in the area obtained by CR-39 track detectors were between 29 Bq/m³ and 167 Bq/m³, and average concentration of 82.1 Bq/m³ and standard deviation of 3.3 Bq/m³.

As can be seen in Table 1 the areas with high level of concentration can be observed. Those are areas in dwellings of Velika, Donja and Gornja Gata. Such high level of indoor radon concentration can be explained due to geothermal springs in the area. Also, the majority of houses in these inhabited areas have basements. If there were no basements in those houses the levels of radon would be even higher, the dwelling walls are plastered with lime mortar and the floors have hardwood layers. The dosimeters were placed in the ground floor living rooms in order to obtain clear information on indoor concentration of radon due to geothermal springs in the area.

Another area with higher concentration of radon can be observed in the area of villages Spahići, Založje and Čekrije. The houses in that areas are relatively old, without cellars, dosimeters are placed in the ground floor living rooms where people also smoke. All mentioned parameters have certain influence on indoor radon concentration above average.

Besides the areas of the high indoor radon concentration there are low indoor radon concentration area which consists of villages Orljani, Pritoka, Lohovo and Ripač. The core characteristics of these areas are that the houses are relatively new, most of the houses have basements, they are non smoking areas and dosimeters were mostly placed on the first and second floor.

The difference in these areas can be due to the difference in the geological structure of soil in the area but they are no sufficient research data on that.

The comparison with measurements in the area of Zagreb (Vekić at al. 1999), Osijek (Planinić et al. 1999), Ljubljana (Kobal at al. 1988) and Novi Sad (Foprkapić at al. 2006) shows that Bihać area belongs to the area of low or average indoor radon concentration.

The estimated effective equivalent dose for radon and its short lived progeny can be calculated from the following formula (Durčik et al., 1997.):

$$H_E = (k_1 + k_2 F) C_{Rn} T. \quad (1)$$

Where $k_1=0,17$ nSv/Bqhm⁻³ and $k_2=9,0$ nSv/Bqhm⁻³, and T is annual time spent indoors (≈ 7000 hours) with concentration of radon C_{Rn} activity. Standard aerosols concentration of $10^3 - 2 \cdot 10^4$ atoms/cm³ are average equilibrium factor in dwellings for 0,2 – 0,4 with mean value of $F = 0,3$ (Farid, 1993).

According to this and with mean annual radon concentration of 82.1 Bq/m³ the annual effective equivalent dose is:

$$H_E = 1.65 \text{ mSv/year.} \quad (2)$$

Natural radioactive sources produce average annual effective dose 2.4 mSv, out of which 1.2 mSv represents inhalation of radon and its daughters both outdoors and indoors.

5 Conclusion

The systematic measurement of indoor radon concentration in dwellings of Bihać municipality by the method of nuclear track detectors showed average value between 29 Bq/m³ and 167 Bq/m³, with the mean value of 82.1 Bq/m³ and standard deviation of 3.3 Bq/m³.

The measured concentration of indoor radon activity in Bihać municipality shows areas with relatively high indoor radon concentration (167 Bq/m³) and relatively low indoor radon concentration. High indoor radon concentration is due to nearby geothermal hot spring location and the old age of houses in one location and the absence of basements, the type of flooring and plaster in the other location. Above this, there is possibility that geological structure of soil plays important part in these differences but it is not possible to conclude it from the existing data.

The average annual effective equivalent dose for the occupants in Bihać municipality is estimated as 1.65 mSv per year.

Therefore, it can be concluded that Bihać municipality (M. Sohrabi 1996) is the area of a low level natural radon area (LLNRA).

Acknowledgement. The results shown here have been obtained within the scientific project (Istraživanje dugodosežnih korelacija i stohastično modeliranje na nivou stanice) financially supported by the Ministry of Science, Education and Sports of the Republic of Croatia.

References

- [1] Fleischer R.L., Price P.B., Walker, R.M., *Nuclear tracks in solids. Principles and Applications*. Berkeley: University of California Press, 1975.
- [2] Forkapić, S., Bikit, I., Slivka, J., Čonkić, L.J., Vesković, M., Todorović, N., Varga, E., Mrđa, D., Hulber, E. Indoor radon in rural dwellings of the South-Pannonian region. *Radiation Protection Dosimetry*. 123(3), 378-83, 2006.
- [3] Kobal, I., Vaupotič, J., Burger, J., Stegnar P. Preliminary Measurements of Indoor Radon in Ljubljana, Yugoslavia. *Journal of Environmental Radioactivity*. 40(1), 1-10, 1988.
- [4] Planinić, J., Faj, Z., Radolić, V., Šmit, G., Faj, D. Indoor radon dose assessment for Osijek. *Journal of Environmental Radioactivity*, 44(1), 99-106, 1999.
- [5] Sohrabi, M. High Radon Levels in Nature and in Dwellings: Remedial Actions. U: Durrani S.A., Ilić R., *Radon Measurements by Etched Track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment*, pp. 225-242, 1997.
- [6] Vekić, B., Barišić, D., Lokobauer, N. Measurement of radon during the conditioning process of spent radium-226 sources in Croatia. *Proceedings of IRPA Regional Congress on Radiation Protection in Central Europe*. Deme, Sandor, editor(s). Budimpesta : Roland Eotvos Physical Society.
- [7] BEIR IV Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation *Health Risks of Radon and other Internally deposited Alpha-Emitters*. NAS/NRC, National Academy Press, Washington DC, 1988.
- [8] Čremošnik, I. Arheološka istraživanja u okolini Bihaća. *Glasnik Zemaljskog muzeja, nova serija, XII, str. 117-136*. Sarajevo, 1958.
- [9] ICRP Protection against ^{222}Rn at home and at work. *ICRP Publication 65, Ann. ICRP 23*, No. 2. 1993.
- [10] ICRP Human respiratory tract model for radiological protection. *ICRP Publications 66, Ann. ICRP 24*, No. 1-4., 1994.
- [11] Durcik, M., Havlik, F., Vicinová, M., Nikodemová D. Radon Risk Assessment in Slovak Kindergartens and Basic Schools. *Radiation Protection Dosimetry*. 71:201-206. 1997.
- [12] Farid, S.M., Equilibrium Factor and Dosimetry of Radon by CR-39 Nuclear Track Detector. *Radiation Protection Dosimetry*. 50:57-61, 1993.

E-učenje u službi kvalitete nastave geometrije Iskustva na građevinskom fakultetu

E-learning in enhancing teaching quality in geometry Experience on Civil Engineering Faculty

Lidija Pletenac

Sažetak. U težnji za što kvalitetnijim ostvarenjem svih ciljeva sveučilišne nastave, dugi niz godina uvode se inovacije u nastavni proces geometrijskih kolegija. To je “bottom -up” doprinos razvoju kulture kvalitete. Kultura kvalitete [16] je institucionalno podržano okruženje, pogodno za kvalitetan rad studenta i nastavnika. Elementi e-učenja postupno su nastajali uz uporabu različitog software-a, da bi prešli u e-kolegije tek sada. Nove tehnologije obogaćivale su nastavu godinama ali i donosile nova iskustva, probleme i dodatni angažman. Primjer nove tehnologije za e-učenje je LMS (Moodle) koji se primjenjuje u zadnje dvije akademske godine (2007/08 i 2008/09). Dolazi se do zanimljivih iskustava i zapažanja, koja služe kao putokaz i svjetlo na putu u budućnost.

Ključne riječi: e-učenje, sveučilišna nastava, tehnologije u nastavi, geometrija, LMS, reforma, ECTS sustav ocjenjivanja

Abstract. In order to achieve all goals in the university education process in geometric subjects, we incorporate innovations for a long period. This is a “bottom-up” contribution to the development of quality culture. Quality culture [16] is institutionalised environment favourably for quality work. Elements of e-learning have emerged gradually with the use of different software and to switch to e-courses only in recent times. New technologies are enriched classes for years but also brought new experiences, problems and further work. An example of new technology for e-learning is the LMS (Moodle), which is applied in the last two academic years (2007/08 and 2008/09) in the constructive geometry. One comes to the interesting experiences and observations, which serve as a guideline and light on the way to the future.

Key words: e-learning, academic education, technology, geometry, LMS, reform, ECTS

1. Uvod

Bolonjskim procesom kvaliteta je postala vrlo moderan pojam, premda se može različito definirati. Kvaliteta *nastave* i kvaliteta *postignutih rezultata* učenja, različite su kategorije: Uz istu kvalitetu nastave, svaki student postiže različite rezultate. Dok na prvu, uz vanjske faktore, nastavnik ima znatnog utjecaja, druga je ovisna o prvoj ali više podložna cijelom nizu okolnosti i nemoguća bez aktivne suradnje studenta. Procjenjivati prvu mogu stručnjaci, metodičari, a drugu stručnjaci onog profila, za koji se studenti spremaju. Studenti, kroz ankete, daju svoj dojam, svoje viđenje nastave. Zapažanje iz direktnih razgovora sa studentima: bolji studenti imaju bolje a lošiji lošije mišljenje o istoj nastavi.

Kvalitetu postignutog ishoda učenja ne pokazuje puko prebrojavanje bodova, bez obzira iz koje su aktivnosti sakupljeni, već sve ono što su studenti u stanju riješiti. Slično mišljenje izrazili su i poslodavci, u okviru projekta IGI [19].

E-učenje [14], [15] treba biti u službi kvalitete nastave, kao jedan od unutarnjih faktora. Međutim, svi vidovi te kvalitete su “osjetljive biljke” i mogu uspjevati samo u adekvatnoj kulturi. Podložnost raznim okolnostima dovodi do slabljenja kvalitete, koja može ponekad ostati samo “slovo na papiru”. Sveučilište u Rijeci, dokumentima i koracima za uvođenje e-učenja [18], u okviru suradnje na projektu EQUIBELT [11], [12], pridonosi izgradnji kulture kvalitete, u kojoj će nastava i rezultati učenja biti bolji.

2. Izazovi tehnologije u nastavi geometrijskih kolegija

Multimedijalna nastava predstavlja težnju ka kvalitetnijoj (bogatijoj) i efikasnijoj nastavi, u čemu računalo ima više raznih uloga ali sve one nisu dovoljne: Odavno se osjećala potreba za nekim vidom “online” komunikacije sudionika obrazovnog procesa ili bar “offline” učenja uz pomoć računala, izvan nastave. Ono o čemu smo tek sanjali 70 ih godina 20.st. (kad je novost bio pojam NPK - nastava pomoću kompjutora), *sustavi za e-učenje* (LMS) sada su već u širokoj primjeni u svijetu a posljednjih godina i u Hrvatskoj. No povijest e-učenja starija je od pojave tih sustava, koji su zapravo softverski alati u nastavi i objedinjuju faze učenja, za koje su ranije korišteni nezavisni softverski alati. Naziv *e-učenje* obuhvaća uporabu računala u predavaonici za multimedijske prezentacije i simulacije, mješovitu (eng. mixed-mode, hybrid) nastavu koja koristi i direktan kontakt u predavaonici i online aktivnosti, sve do potpuno online organizirane nastave.

The screenshot shows a Moodle course page for 'Geometrijska grafika (M-781)'. The page is viewed in Mozilla Firefox. The main content area is titled 'Općenito' and contains a forum post about 3D graphics. The left sidebar has navigation menus for 'Korisnici', 'Aktivnosti', 'Pretraži forum', and 'Administracija'. The right sidebar shows 'Najsvežije vijesti' and 'Buduća događanja'. The bottom of the browser shows the Windows taskbar with the start button and several open applications.

Slika 1. Stranice jednog od kolegija na stručnom studiju

U nastavi geometrijskih kolegija Građevinskog fakulteta (GF) u Rijeci koriste se (pored službene stranice kolegija) prezentacije s animacijama postupaka i simulacijama, nastavni materijali na Internet stranici, LMS Moodle na kojem se razvijaju e-kolegiji, prvi u Hrvatskoj za konstruktivnu geometriju. U e –kolegij (Sl.1) ugrađene su informacije o kolegiju i načinu rada, nastavni sadržaji, zadaci za vježbe s popratnim materijalom, programski zadaci koje treba predati (“upload”), ocjene vježbi, kolokviji, upute za ispit i provjere znanja te rezultati ispita.

Na GF u Rijeci, e-učenje prošlo je kroz razne faze. Bila je to nastava u kojoj se koriste različiti vidovi učenja te različiti mediji za prezentiranje sadržaja (uz tekst sa slikama i zvuk, video, animacije, simulacije), softverski alati pa i online provjere znanja.

2.1. Povijest razvoja e-učenja naših studenata na geometriji počinje 1988.

Kroz prošlost Građevinskog fakulteta u Rijeci, razne nastavne tehnologije služile su geometrijskim kolegijima a i računala su uvedena vrlo rano. Pogledajmo

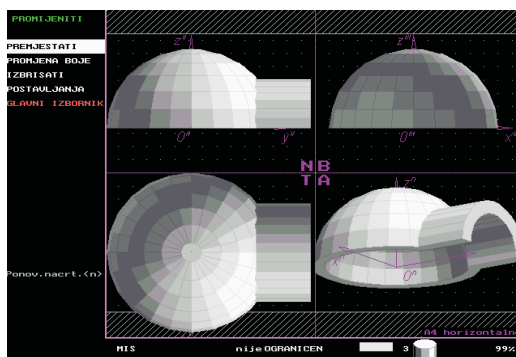
njihov razvoj i pojavu prvih oblika e-učenje, bez povijesti izvođenja nastave, nastavnika, sadržaja i sati:

- Od osnutka Fakulteta, 1975. tehnologije bijahu “kreda i ploča” predavanja, odnosno “PED - pencil-aided design”.
- Vizualizacija trodimenzionalnih geometrijskih tvorevina anaglifskim slikama [4] uvedena je 1983., uz pomoć dijapozitiva i dijaprojektora. Zatim su došle grafo-folije i grafoskop.

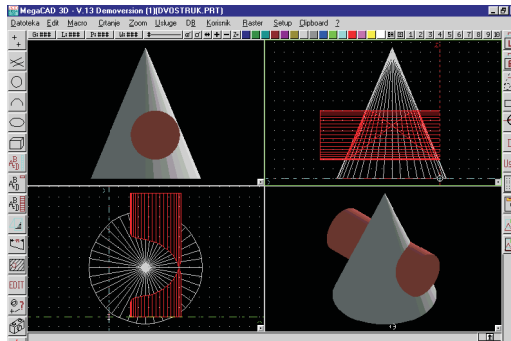
Početak učenja uz pomoć računala zbio se u doba Svjetske konferencije za geometriju i grafiku 1988. u Beču, kad je na GF u Rijeci (privatno) računalo “Amiga 500” ušlo u nastavu 1987/88. grafičkim prikazima 3D ploha, programiranim u Amiga basic-u (simulacije izvođenja, nastanka plohe). Taj isti računalni program, osim predavanja, služio je i za interaktivno rješavanje zadanih grafičkih radova, na nastavi (lokalno na računalu). Bilo je to *offline* e-učenje i to *face to face*. Pobudilo je interes studenata.

- Izlaganje o tome [7] rezultiralo je poklonom obrazovnog software-a CAD DG i CAD 3D iz Beča (Prof. Stachel), na međunarodnom simpoziju na Plitvicama. Software je dostupan lokalno (u učionici, na hrvatskom) zatim na Internetu, na više jezika pa i na hrvatskom (sl.2). Time je studentu omogućena vremenska i prostorna fleksibilnost: mogao je i izvan zgrade fakulteta interaktivno eksperimentirati s geometrijskim tvorevinama (tvorbu, presjeke, probodišta, prodore) u virtualnom prostoru, i učiti radeći.

Na predavanju je (1988/89) kao monitor služio veliki fakultetski televizor. Činjenica je da Fakultet tada nije nabavio LCD panel za projiciranje preko grafoskopa. Zahtjev je odbijen zbog nedostatka institucionalne vizije i smjernica za upotrebu novih tehnologija. Geometrija je u to vrijeme u nastavi imala tehnologije koje se na Fakultetu inače nisu koristile, dok su ostali građevinski fakulteti u Hrvatskoj predavali geometriju isključivo klasičnom tehnologijom.



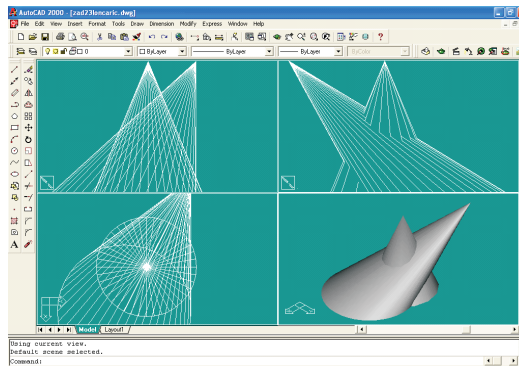
Slika 2. CAD3D, model svoda



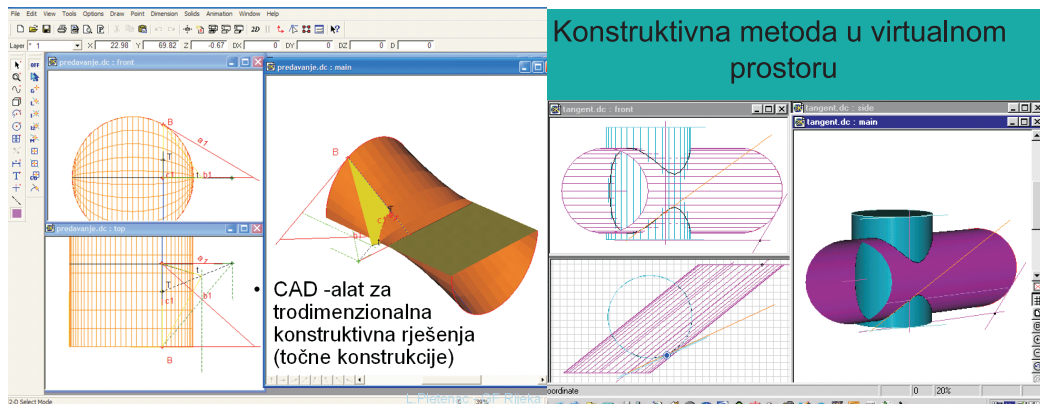
Slika 3. Mega CAD, vidljivost prodora

- video-tehnologija omogućila je virtualne ekskurzije na građevinske objekte, geometrijskih formi, od 1993. još niz godina.

Oblik e-učenja je i rad na zadacima uz uporabu profesionalnog CAD software-a [6] kao alata. On je došao u geometriju kupnjom AutoCAD 10, zatim MegaCAD-a, koji je nudio više od drugih (brojne konstrukcije krivulja, usklađene prozore za projekcije i točkast prikaz skrivenih bridova objekta, (Sl.3.). Tad se već koristio LCD panel na grafoskopu te novije verzije AutoCAD (Sl.4.). Implementaciju najnovijih verzija AutoCAD u geometriji zamijenila je kupnja DesignCAD-a (Sl.5.) negdje 2002. g., koji se intenzivno rabio u nastavi sve do ukidanja dvaju kolegija, 2005.g. Ukinuto je i geometrijsko modeliranje, kao dio kolegija Modeliranje konstrukcija.



Slika 4. Auto CAD 14, prodor



Slika 5. Design CAD, dirna ravnina plohe, tangenta prodora

Novi oblici e-učenja postaju neophodni u službi kvalitete, pojavom novih problema. Iskustvo: Reformom 2005. sažimaju se studiji, što se moralo dogoditi i kod nas. Tada završava jedno razdoblje uspješne nastave nacrtne i primijenjene geometrije na GF Rijeka, koja je pratila razvoj računalne grafike i CAD-a te izvodila konstrukcije u prostoru (Sl.5.). Kolegiji s najvećom prolaznošću (63,73% i 80,68%) i gotovo najvišim ocjenama (3,38 i 3,12) na 1. godini sveučilišnog studija [13] (od ne-društvenih kolegija), ugašeni su u korist sažetog kolegija: U ak. god. 2005/06 na GF Rijeka uvedena je Konstruktivna geometrija, vrednovana gotovo upola manje od kolegija sa 9 ECTS i manje nego u Zagrebu (6 na GF, 7 na Prirodoslovno matematičkom fakultetu). Zalaganje studenata i prolaznost na ispitu (i tri kolokvija), naglo opadaju. U toj fazi probleme treba razmotriti i rješavati. Novost je zapažanje da studenti 2005/06 geometriju rade izrazito neredovito, jer (kako kažu) svaki tjedan pripremaju kolokvij iz nekog drugog kolegija, za razliku od ranijih generacija, a k tome predmet nije jednako vrijedan kao drugi. Provedeno je istraživanje. Prema anketi, u generaciji 2006/07. između 12% i 17 % studenata radi na geometrijskom kolegiju dovoljno sati tjedno za tih 5 ECTS [21]. Čak 42% studenata izjavljuje kako se ne stignu pripremiti. (Premda se ocjenjuje rad na svakoj vježbi ocjenom od 1 do 5.) Na aktivnoj nastavi pokazuju nespremnost. Slični problemi pojavljuju se i u drugim zemljama, u početku primjene reforme. “Sad je vrijeme pomaknuti fokus Bolonjskog procesa, budući da se do 2006. reforma bavila uglavnom s ECTS i strukturom studija a samo sporadično uzimala u obzir kvalitativnu stranu reforme.”[1]

Nameću se pitanja: Što želimo postići uvodeći osiguranje kvalitete (QA)? Kako rješavati probleme u postizanju ciljeva kolegija (u konačnici: kvalitetnog geometrijskog obrazovanja, s upola manje nastave)? Kako odgovor leži u poduzimanju brojnih koraka, nikla su dva nova unutarnja faktora u “bottom-up” razvoju

kvalitete (a jedan je e-učenje): Inicirala sam, organizirala i održala 2006/07. dobrovoljni **uvodni tečaj** nacrtna geometrije te sam 2007/08. otvorila, počela razvijati i koristiti **e-kolegije u LMS Moodle**, za oba stupnja studija, s drugačijim vođenjem studenata kroz kolegij, s jasnim ciljevima svake teme. Iskustvo pokazuje da je uvodni tečaj masovno posjećen i produktivan, što se vidi pri rješavanju prvih vježbi. No tad studentu još uvijek kolegij vrijedi manje nego u Zagrebu i ne stiže odraditi posao. Zahvaljujući razumijevanju Uprave Fakulteta (dojam autora) i stanovitom rasterećenju 1. semestra, situacija se popravlja 2008/09. u pogledu broja sati (3+3) i bodova (6 ECTS) za Konstruktivnu geometriju. Zahvaljujući tom vanjskom faktoru, CAD opet služi e-učenju u vježbama geometrije. Studenti te generacije aktivniji su, zadovoljniji i znatno uspješnije rješavaju tjedne vježbe, postižući prosječno 47,3% bodova [20] kroz semestar, (maksimum je 70%). Prema evidencija vježbi, najbolja grupa ima prosjek 53,2%[20]. Završni ispit 2008/09. pokazuje smanjenje kreativnost pri rješavanju u korist “štreberskog” pristupa. Ipak, većina studenata ga je položila: 85% onih koji su polagali [20].

2.2. Internet tehnologija za e-učenje bez LMS

Nastavni sadržaji na Internetu povećavaju dostupnost informacija, motiviraju i uvažavaju individualne razlike studenata. Za potrebe nastave, među prvima sam otvorila svoju web stranicu za nastavu, poslije prve takve stranice - profesora Kožara. Tada još nije bilo moguće postaviti link na nju sa stranice Fakulteta. Bilo je to u prošlom stoljeću no stranica je ostala u funkciji (kao starina, ali dostupna svima) pored ostalih stranica vezanih za kolegije, dok se ne preuredi u stranicu s aktivnim sadržajima.

- Studenti su nalazili na toj web stranici ilustracije i animacije s predavanja, pitanja za provjeru pred ispit (od 2001.), rezultate ispita i drugo. Stranicu su rabile u nastavi i kolege na drugim građevinskim fakultetima (Split, Osijek,...) i tko zna gdje još, jer pristup nije ograničen. Iz e- pošte koju dobijem vidi se da u SAD netko primijeti tu stranicu i poziva na suradnju.
- U okviru manjeg projekta [9] izrađeni su nastavni materijali “Geometrija u računalnoj grafici” za interaktivno učenje, 2005.

Oblici e-učenja (e-animacije i simulacije u predavanju *f2f* i nastavni materijali na Internetu) dobro su prihvaćani od strane studenata. Anketiranjem su dobiveni podaci [5] o tome koliko utječe na motivaciju, razumijevanje, usvajanje i mogućnost primjene stečenih kompetencija (ocijenili su uglavnom sa 4/5). Tu se pokazalo da 60% studenata želi geometriju sa CAD-om u nekoj kombinaciji. Njih 63% izjavilo je da su se dosta služili nastavnim materijalima na web stranici za taj kolegij, premda nisu prisiljeni.

- Usmeni ispit Primijenjene geometrije u obliku popularne igre “Milijunaš”, godine 2003. bio je ponuđen kao alternativa klasičnom [5]. Iskustvo je pokazalo kako ovu svojevrsnu avanturu na ispitu radije biraju studenti nego studentice. Softver je bio kućne izrade a kao nagrade, «dijelio» je ocjene. O načinu ispitivanja obaviješteni su Dekan i Prodekan. (Ne nalazim podatke da je prije toga na GF Rijeka neki ispit održan uz pomoć računala, ako se ne polaže Informatika.)
- Kolokvij na Microsoft SharePoint 2005/06. zadao je neočekivane probleme, premda su dodjele ovlasti u SharePoint obavljene od strane informatičara na fakultetu. Studenti nisu mogli predati radove. Trebalo se snaći u trenu i pokupiti radove na medij. Stručno obrazloženje (koje sam kasnije dobila), glasilo je: problem sa serverom.
- Iako se već drugu godinu u Konstruktivnu geometriju uvodi e-learning software Moodle, tek 2008/09 održan je kolokvij i popravni kolokviji na računalu, koristeći “Moodle”. To je bilo ispunjenje davnih želja (iz 70-tih) ali uz dugotrajno oblikovanje velikog broja zadataka. Organizacija i provedba testa sjajno funkcionira, studentima se sviđa, sretni su trenutnim visokim rezultatima.

Nemalo smo se iznenadili lošim iskustvom: Moodle je pri slijedećem otvaranju studentima smanjio bodove a nekima postavio na nulu. Ovo je bilo stresno za studente. Kolokvij nije poništen jer sam uspjela bodovati ručno. Na Internetu sam otkrila da su i drugi korisnici Moodle 1.8. u svijetu imali iskustvo krivog zbrajanja bodova. Programer odgovara da je to već popravljao i uvidio da je to normalno ponašanje programa u nekim okolnostima. Srećom, taj se problem nije ponovio na kasnijim kolokvijima. U verziji Moodle 1.9. nema navedenih problema. Zaključak se nameće sam: trebalo je pričekati s primjenom nove tehnologije.

Svi oblici e-učenja dobro su prihvaćani od strane studenata: logiraju se na stranice e-kolegija, informiraju se, preuzimaju vježbe i materijale uz njih, otvaraju primjere u CAD-u, rado polažu ali na forumu e-kolegija ne odgovaraju javno na postavljena geometrijska pitanja. Budući inženjeri moraju znati skicirati, ručno crtati i nadasve razmišljati u prostoru. Stoga geometrijske kolegije treba voditi u hibridnom sustavu e-učenja.

3. Povijest (i sudbina) teorije projiciranja

3.1. Izvorna “*la Géométrie Descriptive*”

Gaspard Monge (1746-1818), razvijajući svoju teoriju *Géométrie descriptive*, stvorio je tehnike projiciranja i prikaza, na kojima se temelji sva moderna grafička



Slika 7. G. Monge

komunikacija a koje su do 1794. bile vojna tajna Francuske, kao znanstveni napredak, prestiž, čak nacionalna sigurnost (vojna kartografija). Nakon Francuske Revolucije, Monge-ova knjiga se proširila svijetom i već 1816. ta geometrija uvedena je u američke studije. U Londonu se prvi priručnik pojavljuje tek 1841., kao osnove geometrije za inženjere ali kao teorija nije prihvaćena: izgledala je apstraktna. Predaje se zajedno s izometrijom i kosom projekcijom do 1860., nakon čega “Graphical geometry” rješava crtanje elemenata strojeva. Monge-ova metoda u teoriji prihvaća se u Engleskoj tek kasnije. Ne treba zaboraviti ratove i netrpeljivosti Engleza i Francuza.

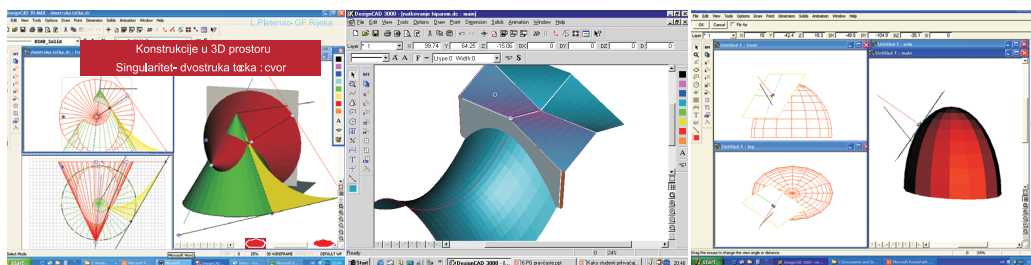
Važnost pridavana Deskriptivnoj geometriji 1868. u sustavu grafičkog komuniciranja bila je pretežno **znanstvena** u Francuskoj (za otkriće projektivne, i drugih geometrija), **estetska** u Njemačkoj, kao teorija umijeća crtanja dok je u Britaniji imala industrijski, **konstruktivni** značaj, u oblikovanju i **modeliranju**. Razumljivo, i *nastavna praksa* bila je vrlo različita u raznim zemljama, kao posljedica generalno različitih predispozicija u (teorijskom) poimanju prostora. Tek 20. stoljeće donosi mnoge promjene ali englesko govorno područje svijeta i danas tu geometriju nastoji zamijeniti *tehničkim crtanjem* na računalu, bez razvijanja prostorne percepcije i znanja o geometriji. Centralna Europa njeguje geometriju. Različito se definiraju ishodi učenja i kvaliteta rezultata.

3.2. Ispred svog vremena

Deskriptivna geometrija bila je napredna za svoje vrijeme i neshvaćena, “apstraktna”, jer je išla “ispred svog vremena”. Danas ona daje znanja i sposobnosti a crtači alati su novi. “Deskriptiva” je baza ali ne može se predavati izdvojeno iz konteksta vremena u kojem živimo, već s ostalim teorijama i tehnikama koje su iz nje proizišle, dakle u širem smislu Konstruktivne geometrije i grafike.[3] U nastavi geometrije, *e-učenje* je dobro došlo, zbog svojih prednosti i doprinosa kvaliteti nastave i naučenog.

Didaktička kvaliteta nastave bila je njegovana i razvijana i prije Bolonjskog procesa: U vrijeme dok su svi građevinski fakulteti u Hrvatskoj imali gotovo jednak nastavni plan i program, na sveučilištima s dosta nastavnog kadra ostvaren je *metodički* i *sadržajni* razvoj nastave Nacrtna i Primijenjene geometrije, (kakav sada promovira Bolonjski proces) dok je *tehnologija* ostajala uglavnom klasična, za svoje vrijeme. Nastavnik koji bi promovirao nove tehnologije u nastavi,

“ispred svog vremena”, nailazio je na poteškoće u njihovoj provedbi. Kvaliteta treba institucionalnu podršku. Manja sredina je ponekad u prednosti pred većim sveučilištem u tome što lakše modernizira metode i fleksibilnije uvodi nove tehnologije. Pokazalo se to na GF u Rijeci, gdje su razvijane metode aktivne nastave uz uporabu novih tehnologija (sl. 8). Stoga je prolaznost na (neobveznim) kolokvijima GF Rijeka 1990.-2005. bila cca 30% , veća nego u Zagrebu [22].



Slika 8. Interaktivna računalna grafika, primjeri geometrijskih konstrukcija direktno u 3D

Sada pri uvođenju *e-učenja*, koje studentu pruža kvalitetnije okruženje, nastavnik mora dodatno sam odraditi puno poslova i rješavati probleme, kao da je “ispred vremena”. Kultura kvalitete nije dovoljno razvijena. Još uvijek se osjeća nedostatak odgovarajuće tehničke i stručne potpore nastavnicima (nemam organiziranu podršku na fakultetu), premda postoje: Informatička podrška, Povjerenstvo Sveučilišta za implementaciju *e-učenja* i rezultati projekta EQIBELT [11], [17]. Tek preseljenje kolegija na sustav za *e-učenje* Sveučilišta u Rijeci “MudRi” obećava stalnu tehničku podršku.

4. Utjecaj vanjskih i unutarnjih faktora na kvalitetu

Svaka visokoškolska ustanova odgovorna je za uspostavu kulture kvalitete u kojoj grupe ljudi rade zajedno u izvršavanju svojih zadataka, kako kaže Dr. sc. B. Divjak: “Each institution of higher education (HEI) is responsible for establishing an organisational climate, so called quality culture in which groups of staff work together to realise their specific tasks” [1].

4.1. Faktori koji utječu na kvalitetu

Kvaliteta postignutog znanja i sposobnosti zavisna je od vanjskih okolnosti i unutarnjeg okruženja na kolegiju te subjektivnih stavova svih sudionika. Zakonska regulativa, Pravilnik o studijima, akcije informiranja studenata *vanjski* su faktori

kao i opremljenost fakulteta, broj kolegija u semestru, organiziranost nastave i službi te razvijenost kulture kvalitete na fakultetu. *Unutarnje* okolnosti kolegija su nastavni sadržaji i metode, tehnologija u nastavi, pristup kvaliteti nastave, entuzijazam nastavnika i akcije koje poduzima, stavovi, angažman i radne navike studenata itd. To je splet objektivnih i subjektivnih faktora.

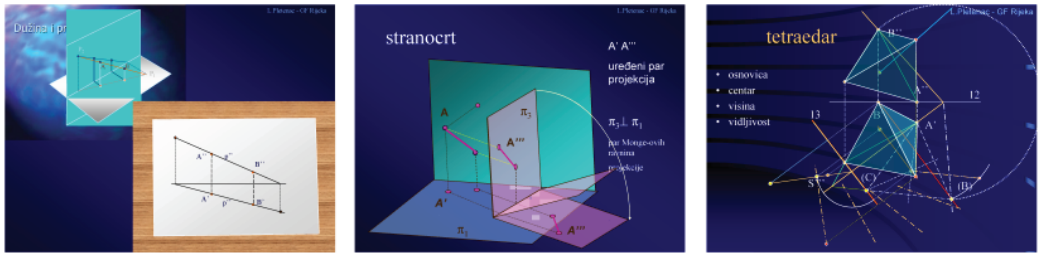
Vanjske i unutarnje okolnosti mogu imati pozitivan ili negativan učinak na kvalitetu postignutog (znanja i sposobnosti). "Dobitna kombinacija" je ona s pozitivnim učinkom vanjskih i unutarnjih faktora. Ona je ostvarena u pogledu uspjeha na vježbama Konstruktivne geometrije, sveučilišnog studija 2008/09. Tu su, naime, studenti izrazito dobro rješavali zadatke na vježbama. Na stručnom studiju (Geometrijska grafika) nije ostvarena u prvom semestru (studenti nisu uspješni u radu) a u drugom se donekle ostvaruje. Iz rezultata koje studenti postižu kroz semestar slijedi zanimljivo iskustvo: Pokazalo se da jedan te isti vanjski faktor može imati pozitivan upliv na jednu populaciju a negativan na drugu, zbog njezinih stavova i motiva. Tako jedan pravilnik može potaknuti veće zalaganje na vježbama kod jednih a borbu za minimalne bodove kod drugih. Upravo to su pokazali studenti sveučilišnog i stručnog studija.

4.2. E-učenje u službi kvalitete postignutih sposobnosti i znanja

1) **Sposobnosti** koje se razvijaju bavljenjem Deskriptivnom geometrijom (prostorna percepcija objekta, odabir 3D konstruktivnih metoda rješavanja, razumijevanje nacrta), **znanja** (geometrijska svojstva raznih projiciranja, transformacija, konstruiranje presjeka tijela i ploha), **način** geometrijskog sintetičkog **razmišljanja** i **kreativni pristup** rješavanju 3D problema, **vještine** prikazivanja objekta, sve to nije moguće steći izvan fakulteta, usput. Ne uči se ni prije (u gimnaziji) niti u nastavku studija. Sve treba usvojiti u 15 tjedana prvog semestra i stečene sposobnosti ponijeti kroz život. Početnicima je to strano područje a neki studenti traže instrukcije pred ispit, kao zamjenu za redoviti rad. Stoga treba ubrzati učenje uz pomoć novih tehnologija ali studenti teško mogu svaki kolegij temeljito usvajati. Čovjek lakše zaboravlja potpuno nova znanja a bavljenje Deskriptivom 3 mjeseca u životu ne garantira dovoljno iskustva. To je specifičnost ovog kolegija. Mala je, gotovo nikakva vjerojatnost da će budući inženjeri sami steći ona znanja i sposobnosti, koje su ranijim generacijama arhitekata, građevinara i geodeta bili temeljito ugrađeni, kao sastavni dio njihove tehničke kulture. (Neki još pamte svoja ispitna pitanja.) S druge strane, mladi ljudi pokazuju sposobnost samostalnog učenja drugih disciplina kao što su strani jezici a posebno informatika: Prema anketama [2], do 50 % studenata GF izjavljuje (smatra) kako je većinu svog informatičkog znanja steklo samostalno, prije fakulteta (iako je informatika u redovitom srednjoškolskom nastavnom programu) a 94% njih dobro poznaje Internet - tehnologiju. Kroz ankete [5] *niti jedan student*

nije izjavio kako je samostalno naučio nacrtati niti bilo koju geometriju, kao granu matematike izvan školskog programa. Naprotiv: bar 50% naših studenata prvi put se susreće s ovom geometrijom [5], čini im se teška te je izbjegavaju u drugom semestru (ne upisuju izborni geometrijski kolegij). Nastavnik sam tu može nešto malo pomoći, uvodeći e-učenje:

E-učenja u rješavanju ovog problema pruža podršku studentu, daje nastavne materijale na dohvat ruke (linkovi na pdf datoteke i animirane prezentacije ppt, sl. 9) i repetitorij elementarnih znanja po najčešćim pitanjima (pdf).



Slika 9. Animirane prezentacije s predavanja, dostupne s e-kolegija linkom na Internetu

Usporedba: Kod ranijih generacija, bavljenje geometrijom u 2. semestru rezultiralo je solidnijim i trajnijim znanjem. Zanimljivo zapažanje: mnogi studenti (njih 74) za vrijeme 2. semestra logiraju se na stranicu e-kolegija Konstruktivna geometrija ali ne bave se geometrijom, ne otvaraju pojedine vježbe i materijale već pregledavaju kolegij, forum, tabelu s bodovima po aktivnostima i rezultate ispita.

2) Uloga e-kolegija je organizirati fleksibilan pristup učenju u bilo koje vrijeme i s bilo kojeg mjesta, što odgovara individualnim potrebama studenta u pripremi za aktivnu nastavu. Studenti rado prihvaćaju da je materijal za vježbe na stranici kolegija, redovito otvaraju vježbu, ali većina to radi tek dan prije nastave. Postavljaju pitanja kad će i naredne vježbe biti vidljive studentu. Sve više se pripremaju za vježbe. U generaciji 2008/09 (s 3 sata vježbi tjedno) rijetki pojedinac u grupi ne može riješiti zadatak, nije se pripremio. To je dijelom trka za bodovima (očita iz redovitih pitanja “koliko bodova dobivam”) a dijelom rezultat zadovoljavajućeg broja sati vježbi te uporabe e-učenja u mješovitom modelu. Sve ove okolnosti su značajne.

Poznata je i dokazana činjenica da veći broj sati rada sa studentima rezultira boljim uspjehom u rješavanju pa i ocjenama. Po nekim ispitivanjima (USA), veći porast ocjena postižu studentice, vježbajući prostorne sposobnosti [9]. Naše iskustvo na GF je da studenti u grupi usvoje do cca 80% onoga što se radi zajedno

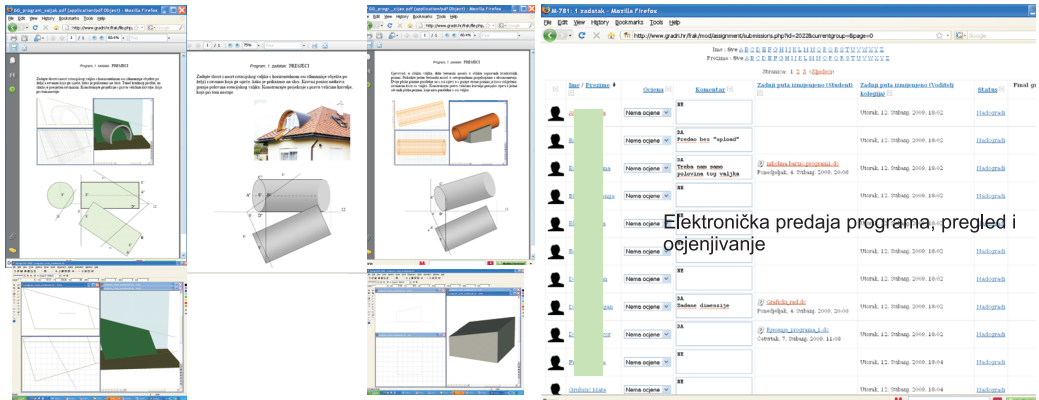
s njima [5]. Nadalje, razvijajući e-kolegije, provelo se ispitivanje usmjereno ka studentu (problemi, dileme i pitanja s kojim se susreću, oblike pomoći i savjete koje traže, česta pitanja) u suradnji s demonstratorima. Razradili smo hijerarhiju uzroka i posljedica ključnih problema, kako bi se u okviru e-kolegija ponudilo odgovarajuće materijale i aktivnosti, kao pomoć u pravom trenutku (neobjavljen rad za znanstveno–stručni kolokvij HDGG).

4.3. Uloga e-učenja u otklanjanju nepovoljnih utjecaja

Za svaki zapaženi problem, gdje kombinacija faktora ugrožava kvalitetu postignutih znanja i sposobnosti (ne bodova po svim mogućim aktivnostima), treba ispitati može li e-učenje pomoći u postizanju željenog rezultata.

Zapažanja:

1. E-učenje nam pomaže poticati **smisleno učenje**, usredotočiti pažnju studenta na znanje, olakšati aktivno učenje s razumijevanjem a tek onda će bodovi biti nagrada. Stoga uz svaku vježbu u sklopu e-kolegija postoji materijal koji *usmjerava* rješavanje. Problem koji time otklanjamo: Medijska propaganda o ECTS sustavu utječe na stvaranje javnog mišljenja. Studentima je jasna važnost sakupljanja bodova. To novo okruženje pomoglo je u aktiviranju studenata na nastavi, ali čim uoče da se, primjerice, diskusija na predavanju ne boduje kao ni prepoznavanje primjera u graditeljstvu, prestaju surađivati. Više nego raniji studenti, prednost daju *formalnostima* a ne *razumijevanju* i kreativnom pristupu. Stalno provjeravaju koliko imaju bodova, za razliku od ranijih generacija, koje su na geometrijskim kolegijima tjedno ocjenjivane preciznijom ocjenom, od 1 do 5.
2. E-učenje dodatno potiče **timski rad**, koji razvija komunikaciju i učenje kroz suradnju, kolegijalnost i pozitivne osobine ličnosti, čime korigiramo negativan upliv relativnog ocjenjivanja na kolegijalnu suradnju i pomaganje (u konkurenciji).
3. E-učenje ima zadaću privući i **aktivirati na zadacima** i one studente koji ne namjeravaju redovito rješavati i predati u zadanom roku. Posebno kod programa (sl. 10) to dolazi do izražaja. Zapažanje: Stav studenata prema učenju i angažman na kolegiju zavisan je od vanjskih i unutarnjih okolnosti. Na stručnom studiju, pozitivan vanjski utjecaj je razdvajanje kolegija Geometrijska grafika na dva semestra, čime se postiže postupnost. No unutarnji faktor grupe pokazao se presudan (utjecaj većine, koja ne uči i olako uzima studij). K tome, u početku semestra, vanjski faktori su imali negativan utjecaj (cca 80 studenata nije moglo stati u prostoriju, vježbe u jednoj grupi itd.) Studenti su sve više izostajali i slabije radili. U drugom semestru uvjeti su bolji: dvije grupe za vježbe, predavanja na kojima i studenti rade u CAD-u itd.).



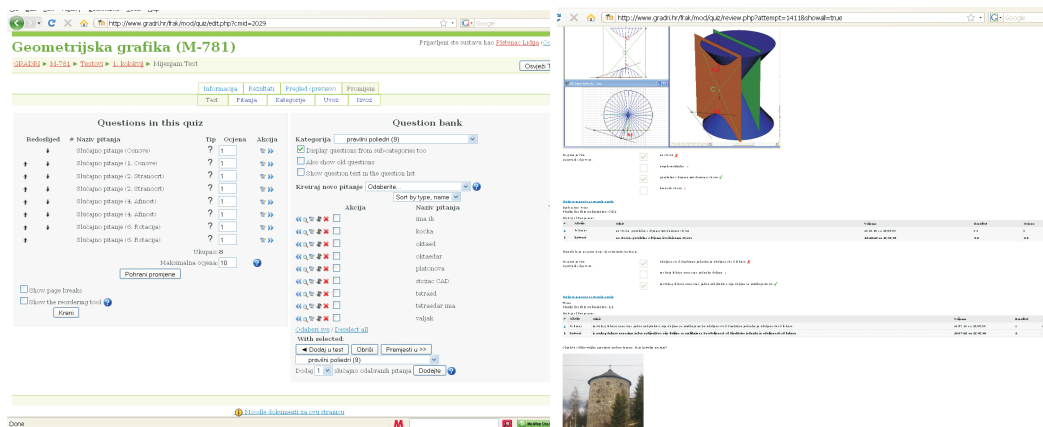
Slika 10. Primjeri programa, zadanih u e-kolegiju i ocjenjivanje s komentarom, čim budu predani

Pomoću e-učenja usmjeravamo, **angažiramo** studente da rade dovoljno sati tjedno i u roku obave poslove, bez naknadne predaje radova. Stoga e-kolegij Geometrijska grafika počinje s napomenama o potrebi redovitog rada i jasnim ciljevima svake lekcije. Međutim, da to nije dovoljno na stručnom studiju, pokazuju česta pitanja kad je popravni termin. Planiraju tada odraditi posao. Kroz e-kolegij se može osigurati kvalitetniji i kreativniji način za postizanje postavljenih obrazovnih ciljeva, samo kod studenata koji hoće raditi.

Regulativa, kao **vanjski faktor**, **različito** je djelovala na stručni i sveučilišni studij: Dok na sveučilišnom studiju gotovo svi postižu iznad 40% kroz semestar (prema evidenciji vježbi 2008/09., 12 od 105 aktivnih studenata ima FX), na stručnom gotovo svi studenti teže postići minimum kroz semestar (prema evidenciji vježbi 2008/09., 14 od 80 studenata ima iznad 40%). To se zbiva iz dva razloga: prvo, takva je “klima” u populaciji “brucoša” stručnog studija i drugo, Pravilnik o studijima im nudi lakši prolaz s ocjenom FX. Prema novom Pravilniku oni rijetki srednji i bolji studenti bili bi relativno ocijenjeni kao izvrsni (A), dok bi većina onih s oko 50% bodova, dobila srednje ocjene. Pri tome je kvaliteta u drugom planu: nitko ne pita kako i da li redovito uče, jesu li naučili i koliko. Tu *e-učenje* ima ulogu naglasiti postignuti uspjeh učenja svakog pojedinca (sl.10). Apsolutno ocjenjivanje primijenjeno je 2008/09 zbog malog broja onih koji su položili. Zapaža se nedovoljan angažman studenta. Popravni kolokviji nekima nisu dovoljni ni za potpis. Na popravni kolokvij izišlo je samo 10 studenata (od ukupno upisanih cca 80), prošlo ih je 3, koji nisu ranije stekli minimalne bodove. Većina (cca 55 njih) je popravljala druge aktivnosti: programe i vježbe.) Zašto je toliko popravaka? Na stručnom studiju većina ne odradi ECTS-om predviđene poslove: predavanja pohađa manje od polovine studenata. Ako se kontrolira, ne prate već se zabavljaju drugim stvarima (čak Internetom) ili ometaju manjinu koja prati. Na

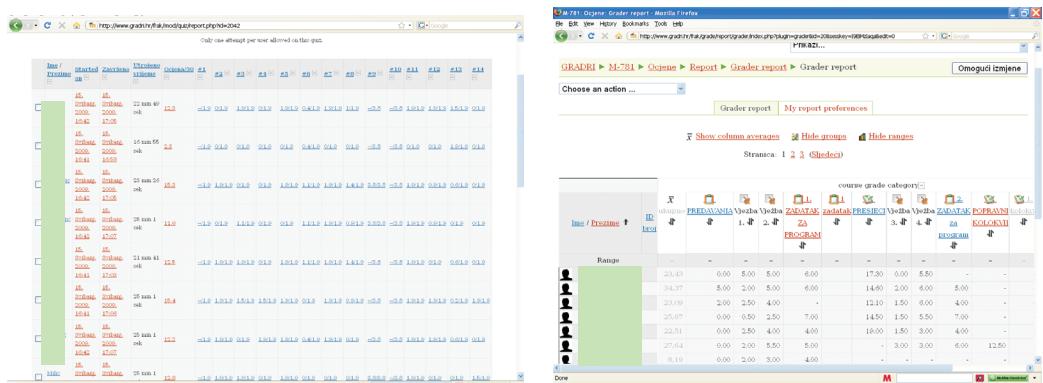
vježbama su mnogi uporno nespremni i neozbiljni, kao i na izradi programa. Ne dovrše rad već čekaju popravni termin za programe i vježbe. Kad ne steknu potpis ili pozitivnu ocjenu, traže svoje “pravo” i naknadne termine.

LMS sustav omogućava više online testova (sl. 11 i 12), kolokvija i drugih provjera u odnosu na klasičnu nastavu. Time želimo poboljšati rad studenta jer se zapaža kako neki studenti, ozbiljnije shvaćaju testove nego usmeni ispit.



Slika 11. Izbor pitanja za pojedini kolokvij, pregled odgovora i rezultati kolokvija

LMS pruža studentu probni ispit za samoprovjeru i upute za daljnji rad, kako bi se izbjegao problem nekolicine studenata (12 novoupisanih na sveučilišnom studiju), koji po treći put na završnom ispitu padnu.



Slika 12. Rezultati kolokvija i sve ocjene studenta

Može se analizirati uspješnosti kolegija zavisno o e-komponenti samo ako je možemo izolirati i ispitivati, tj. kad imamo eksperimentalnu i kontrolnu grupu (bolje generaciju), kod kojih se mijenja samo ta komponenta a sve ostale okolnosti su im gotovo jednake. Između generacija 2006/07 i 2008/09 dogodila se velika promjena u uspješnom rješavanju zadataka na vježbama: od nepripremljenih studenata do onih koji već na demonstraturi prije vježbi riješe zadano i aktivni su na nastavi te postižu dosta bodova. Kako je navedeno, promijenilo se više faktora pa rezultate nije moguće pripisati isključivo e-komponenti.

4.4. Zapažanja u novom okruženju 2008/09.

Za razliku od ranijih generacija, studenti, upisani 2008/09., u razgovorima s nastavnikom često izražavaju unaprijed strah od ispita, (jer samo dvaput smiju pasti), premda je daleko jednostavniji od ranijih ispita. Ta bojazan generira tremu koja otežava koncentraciju. Nadalje, vidi se da gledaju na zadatak (problem) iskustvom učenika a stran im je kontekst primjene. Neki ne uočavaju lako jednostavnost inženjerskog problema u zadatku. Stoga su zadaci s primjenom uneseni u kolegij. Ipak, nakon tri roka, velika većina položila je ispit (na sveučilišnom studiju).

Tu se događa iznenađenje: neki od marljivih studenata, koji su redovito učili sve zadatke unaprijed zadane na stranici e-kolegija, ne znaju se snaći u zadacima na ispitu.

Generacija 2008/09. na Konstruktivnoj geometriji bila je izuzetno aktivna na seminarima i većina je radila savjesno no sve je podredila skupljanju bodova i *formalnom* ispunjenju obveza, premda se boduje samo pokazano znanje. Ispiti su pokazali kako je teško postići one bitne sposobnosti što budući inženjer zaista treba u rješavanju prostornih problema. Zakonitosti prirodnog procesa učenja ne mogu se regulirati pravilnicima.

Vrijedi pravilo: Studenti će moći riješiti samo zadatke onih područja, koja su aktivno rješavali i branili na nastavi (bez precrtavanja).

Zadnjih godina zapaža se pojava agresivnosti studenata u situacijama kad nisu zaslužili potpis ili pozitivnu ocjenu ispita, čime po Pravilniku gube godinu. Nekolicina neprimjereno tada zahtijeva bodove, mimo propisanog.

5. Zaključak

E-učenje je motiviralo studente od svojih početaka do danas a uz LMS pridonosi kulturi kvalitete na Sveučilištu. No na kvalitetu nastave i ishoda učenja utječu mnogi vanjski i unutarnji faktori zajedno, pa e-učenje ne igra presudnu ulogu. “Dobitna kombinacija” je ona s pozitivnim učinkom vanjskih i unutarnjih

faktora. Posebnu važnost ima stav studenata prema učenju i angažman na kolegiju, koji postaje aktivniji uz elemente e-učenja. Većina prosječno uspješnih, marljivih studenata, koji trebaju pomoć i podršku, imat će bolje rezultate u kvalitetnijem okruženju. Dobri, marljivi studenti imat će dobar uspjeh i prolaznost sa ili bez bolonjske reforme, sa ili bez e-učenja. Oni koji ne žele učiti i svaki rad im je previše, neće postići puno ni uz e-učenje. E-učenje služi kvaliteti (pružanju kvalitetne obrazovne usluge) i pomaže ali ne garantira ostvarenje ciljeva.

Primjena *e-učenja* može se prilagoditi potrebama kolegija i očuvanju kvalitete, kad neki faktori utječu negativno. Ciljevi kolegija, prvenstveno razvijanje sposobnosti primjene naučenog, postižu se u mjeri u kojoj su studenti morali rješavati konkretne geometrijske probleme a e-učenje je u službi toga. E-učenje nam je dalo pozitivnih iskustava (motivira studente, pruža im komoditet, jasne ciljeve, transparentnost bodovanja, studenti se bolje pripreme) ali i negativnih (previše angažira nastavnika, koji mora sve obaviti sam, do detalja, te uvijek iznova prelaziti na nove tehnologije).

Opisana zapažanja zanimljiva su i korisna: Studenti rado prihvaćaju e-učenje i traže kompletnu literaturu unutar e-kolegija (stručni studij). Dok je predmet imao uvjete za lako usvajanje, bio je popularan i studenti su u anketama tražili još sati (nacrtana i primijenjena geometrija). Kad ga rade u žurbi, težak je, ne znaju ga primijeniti i ne žele upisati nastavak te geometrije kao izborni kolegij. E-učenje im pomaže ali broj sati nastave i bodovanje (pozitivan efekt vanjskih i unutarnjih faktora) daleko jače utječu na studente nego samo e-učenje. Završni ispit 2008/09 pokazuje smanjenje kreativnost pri rješavanju u korist “štreberskog” pristupa (zna samo naučena rješenja).

Moguće je koristiti ovaj LMS sustav kod srodnih kolegija geometrije i matematike. U svakom kolegiju može se unaprijed dati materijale za predavanja i vježbe, zadavati radove, tjedno pregledavati, unositi bodove i ocjene, testirati, anketirati, komunicirati itd. Pored toga, ostaje obilan posao pregledavati klasične studentske radove, kojih na studiju uvijek ima.

Literatura

- [1] Divjak, B. Quality Culture in Higher Education in Croatia. *Abstracts – 1st Croatian Conference on Geometry and Graphics*, Bjelolasica, 2006, Topic: geometrical education
- [2] Korin-Lustig, A, Lukarić, S. Implementacija e-learning alata u nastavni proces –iskusta s Građevinskog fakulteta, *Zbornik radova XI Građevinskog fakulteta*, Rijeka 2008.
- [3] Ostrogonac-Šešerko, R., Toralba, M. Inelmen, E., Pletenac, L. Visual Communication Curricula for the Global Engineers, časopis *Kog*, br.5: 65-72, 2000/01.
- [4] Pletenac L. Didaktička ispitivanja primjene anaglifičke perspektive. *Zbornik radova VIII Fakulteta graditeljskih znanosti Rijeka*, 1983. (223 – 234)
- [5] Pletenac L. Kako studenti prihvaćaju nove izazove. *Proceedings 10. Znanstveno-stručnog kolokvija HDKGIKG*, Split, 27-29 rujna 2004.
- [6] Pletenac L. Plohe u interaktivnoj grafici. Sažetci Znanstveno stručni skup Hrvatskog društva za konstruktivnu geometriju i kompjutorsku grafiku, Zagreb, 27. rujna 1996.
- [7] Pletenac L. Neke plohe drugog i viših redova i kompjutorska grafika, *Proceedings 2. jugoslavensko – austrijsko savjetovanje za geometriju (Geometrietagung)*, Plitvice, 30. svibanj – 3. lipanj 1988. (organizator Prirodoslovno–matematički fakultet, Matematički odjel) (str. 25)
- [8] Pletenac L. Pristup istraživanju krivulja uz pomoć kompjutora. časopis “*Frak*”, 18/19 god.V, 1986 (23 – 25)
- [9] Pletenac L., Jurasić K. Projekt: Aktualna područja matematike i geometrije u inženjerskoj računalnoj grafici i praksi. (Zaklada)
- [10] Sorby, S, Hungwe. Spatial skills training for K-12 students. *Proceedings ICGG 2008, 13th international conference on geometry and graphics*, Dresden, August 4-8. 2008. p 220.I.
- [11] Workshop Report and Conclusions - 2nd EQIBELT Policy Workshop on Standards in E-learning. (2006). Cavtat, June 22-23, 2006. Preuzeto 10.08.2008 s
- [12] http://eqibelt.srce.hr/fileadmin/dokumenti/tempus_eqibelt/cavtat_2_rad/EQIBELT_2ndPolicyWorkshop_Report_hr_lv.pdf
- [13] http://www.gradri.hr/kvaliteta/20060310_Polaganje_ispita_prolaznost.pdf strana 11.
- [14] <http://www.usd.edu/library/instruction/glossary.shtml>
- [15] <http://www.digitalstrategy.govt.nz/Digital-Strategy-2/>

- [16] <http://www.azvo.hr/lgs.axd?t=16&id=593>
- [17] http://eqibelt.srce.hr/fileadmin/dokumenti/tempus_eqibelt/outcomes/
- [18] http://www.uniri.hr/component/option,com_wrapper/Itemid,172/
- [19] <http://www.gradri.hr/ishodi-ucenja/dokumenti/>
- [20] Evidencija vježbi 2008/09.
- [21] Pletenac L. Osobne bilješke (Rezultati ankete na kolegiju provedene u trećem tjednu i na kraju semestra), 2007.
- [22] Sliepčević, A. Osobna komunikacija, 1991.

Svojstva ploha 4. reda (kvartika) primjenljivih u graditeljstvu

Properties of quartic Surfaces that can be used in engineering

Lidija Pletenac

Sažetak. Kvartike u projektivnom prostoru P^3 mogu imati vrlo različita svojstva i oblike a konačan broj klasa tih ploha još nije poznat. Neke od njih, posebno pravčaste, primjenljive su u arhitekturi i graditeljstvu općenito. Na plohama možemo promatrati razne prostorne krivulje. Od posebnog su značaja u primjeni plohe ravninske krivulje plohe i to što nižeg reda ili čak pravci te plohe. Na nekim kvartikama postoje kružnice, dakle, ravninski presjek može biti kružnica, što je posebna pogodnost kod izvedbe objekta. Kako razvoj tehnologije pomiče granice mogućeg, primjena novih formi postaje izazov modernog graditeljstva.

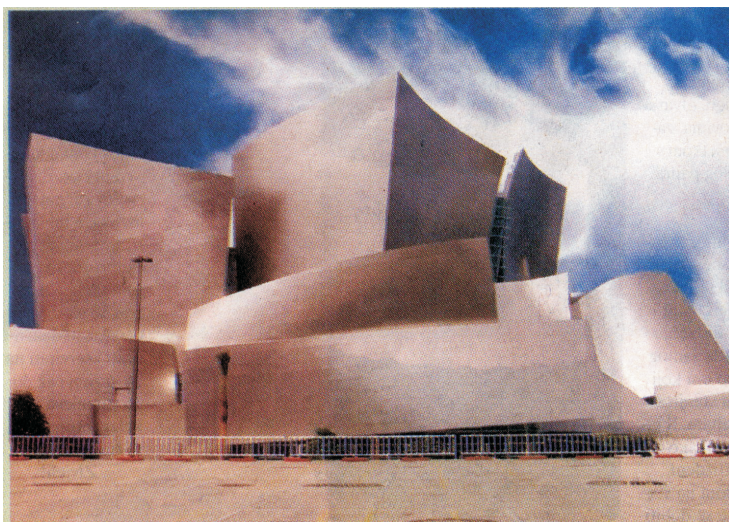
Ključne riječi: pravčaste plohe, nepravčaste plohe, kvartike, primjena u graditeljstvu, svojstva, forme

Abstract. Quartic surfaces in the projective space P^3 can have very different properties and shapes. Finite number of their classes is still unknown. Some of them, especially ruled surfaces, can be used in architecture and engineering. The fact that some quartics contain circles is useful in construction of objects. As the developing technology moves the limits of the possible; use of new shapes becomes an interesting challenge of modern engineering. Modern technical practice needs CAD for engineering as a modelling tool. A virtual model can be created, manipulated and geometrically transformed (if necessary).

Key words: ruled surfaces, non-ruled surfaces, quartics, application in civil engineering, properties, shapes

1. Uvod

Algebarske plohe 4. reda, kvartike, dovoljno su visokog reda da mogu imati potrebnu geometrijsku krutost jedne lake ili tankostijene konstrukcije a opet dovoljno niskog reda da se mogu relativno jednostavno izvoditi, modelirati, geometrijski transformirati i konstruktivno obraditi uz pomoć inženjerskog CAD softvera. Neke od bezbroj kvartika (kako ploha u prostoru P^3 tako i krivulja u ravnini P^2 [14]) poznate su još iz 19. st. ali tadašnja tehnologija građenja nije im omogućila da zažive u projektiranju nekih objekata. Moderna primjena ploha (sl. 1.) kao da nema granica. Ovdje je osvrst na još neke od njih u kontekstu primjene, dok bi detaljna obrada zahtijevala daleko opsežniji prikaz.



Slika 1. Walt Disney Concert Hall

2. Algebarske plohe višeg reda

Generalizacija pojma krivulje, u euklidskom ili projektivnom prostoru P^n je regularna ploha tog prostora. Ploha može biti izražena algebarskim ili transcendentnim funkcijama te raznim parametrizacijama, kao skup od n parametarskih jednadžbi [2]. No plohu možemo definirati i načinom tvorbe (nožišna ploha...), projektivnim svojstvima (skup točaka projektivno pridruženih zadanoj plohi s obzirom na pramen polariteta) te izraziti grafom plohe u euklidskom modelu prostora. Reprerentacija plohe bira se prema načinu obrade i upotrijebljenom softveru. Razumljivo, za primjenu u struci, promatrat ćemo trodimenzionalni realni euklidski model projektivnog prostora i potražiti one plohe čija svojstva izrazito pogoduju primjeni u graditeljstvu.

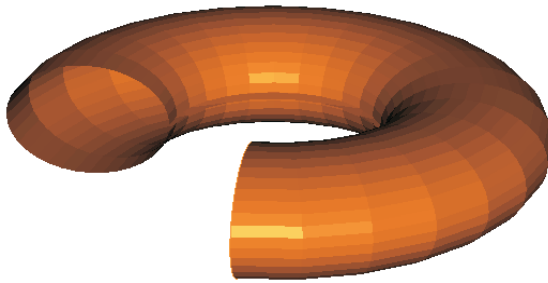
Red plohe jednak je broju sjecišta plohe s pravcem, dok je razred jednak broju dirnih ravnina koje prolaze jednim pravcem.

3. Nepravčaste kvartike

Kod ploha koje nemaju pravce, najprimjenljivije su rotacijske plohe, zbog više ravnina simetrije i zbog bar jednog skupa kružnica plohe [1]. Možda najpoznatija rotacijska kvartika je torus, stalno u primjeni ali pod nazivima objekata (a ne plohe) npr. tunnelska cijev u kružnom zavoju. Torusi su vrsta ciklida. Parametrizacija eliptičkog torusa može se izraziti:

$$(u, v) \rightarrow (\cos u (a + b \cos v), (a + b \cos v) \sin u, c \sin v),$$

gdje je a radijus centralne kružnice, b i c poluosi elipse profila. Iz tih istih podataka: a , b i c moguće ga je modelirati CAD-om (Sl. 2).



Slika 2. Torus

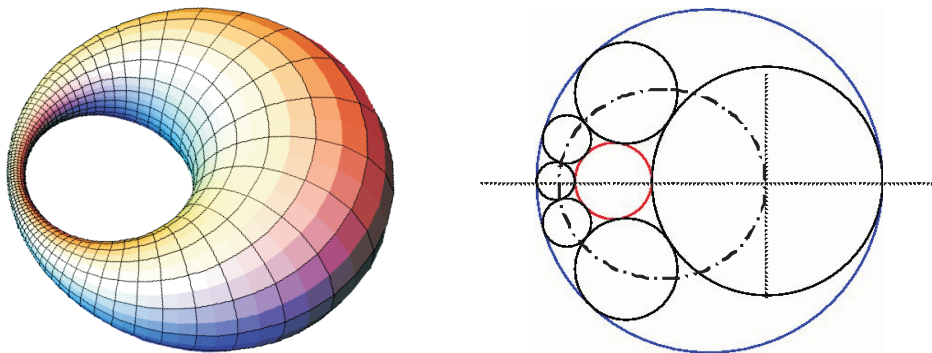
3.1. Ciklide

Među najistraženijim skupinama kvartika su ciklide, kao plohe 4. reda koje dvaput prolaze apsolutnom konikom projektivnog prostora P^3 . To su „kugle višeg reda“ (bisferične plohe) [5]. Neke od njih prikazane su na sl. 3. Mogu se izraziti polinomima u Kartezijevim koordinatama, gdje ih karakterizira obvezan faktor $(x^2 + y^2 + z^2)^2$ dok tzv. sferične plohe imaju u jednadžbi $(x^2 + y^2 + z^2)$. Mogu sadržavati do 6 skupova kružnica [2]. Običnom kvadratnom inverzijom na kugli, iz opće plohe 2 reda nastaje bisferična kvartika. Na takvoj plohi nema realnih pravaca. Postoji (bar jedan) sustav ravnina, koje plohu sijeku u parovima kružnica. Moguće je postići dva sustava parova kružnih presjeka, izborom te polazne opće plohe 2. reda (valjka ili stošca). Nožišnim izvođenjem također mogu nastati ciklide, iz bilo koje plohe 2. reda [7]. Nesferične plohe mogu nastati poopćenim oblicima inverzije [12].



Slika 3. Modeli ciklida u fakultetskim vitrinama u Budimpešti

Dupin-ova ciklida (sl. 4, softver Mathematica [3]) nastaje podvrgne li se kružni torus prostornoj kvadratnoj inverziji, s centrom inverzije u diralištu dviju od plohi upisanih kugli. Kao ciklida, ima to svojstvo da su joj krivulje glavnih normalnih zakrivljenosti (najmanje i najveće) kružnice. To je čini prikladnom za primjenu jer na sebi ima dva sustava kružnica, kao mrežu međusobno okomitih krivulja. U točkama duž svake te kružnice, pripadna glavna zakrivljenost je konstantna, tako da kugla upravo te zakrivljenosti tangira plohu po toj kružnici, koja kugli pripada kao njezina glavna kružnica. Plohi, dakle, možemo upisati i opisati kugle i to oskulacijske. Naravno, poput torusa, i ova ploha ima područja negativne i pozitivne Gaussove zakrivljenosti (hiperboličke točke i eliptičke točke), odijeljena kružnicama paraboličkih točaka.



Slika 4. Dupin-ova ciklida (Charles Dupin 1803. disertacija kod G. Monge) i tlocrt upisanih kugli

Ova ciklida spada u tunnelske (kanalne) plohe jer je anvelopa jednoparametarskog skupa kugli, čiji centri leže na elipsi a radijusi variraju između dviju danih vrijednosti. Uzme li se elipsa centara kugli u horizontalnoj ravnini (sl.4), kugla

koja klizi mijenjajući radijus, tangira ovu plohu uvijek svojim meridijanom, u vertikalnoj ravnini, koja sadrži normalu elipse centara. Konstrukcija nekog objekta može biti u obliku dijela plohe Dupin-ove ciklide, pri čemu lučni nosači dolaze u vertikalnim ravninama i kružnog su oblika. Druge dijelove objekta može tvoriti neka od kugli, koje tangiraju plohu izvana.

3.2. Cisoidne plohe

Među brojnim transformacijama, kojima se mogu generirati plohe, izdvojimo one koje se u primjeni mogu lako izvoditi konstruktivno. Tu spada cisoidno izvođenje, zbog jednostavnosti ideje.

Deloski problem duplikacije kocke doveo je do otkrića Dioklove cisoide [2], [10], [5], [6], [13], [14].

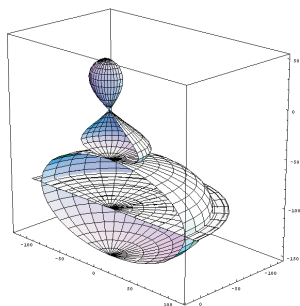
Generalizacijom njene konstrukcije [6], [10], dolazi se do cisoidnog izvođenja krivulja i ploha [6]. Za dvije zadane plohe $\varphi(u, v)$ i $\psi(u, v)$ u realnom prostoru E^3 cisoidna ploha $\chi(\varphi, \psi)$ izvodi se kao skup točaka određenih razlikom kolinearnih radijvektora zadanih ploha, za pol P u ishodištu [10]. Pri uporabi softvera *Mathematica*, prikladno je definirati:

$$\text{cisoid } \chi[\varphi, \psi][u, v] := \varphi[u, v] - \psi[u, v]$$

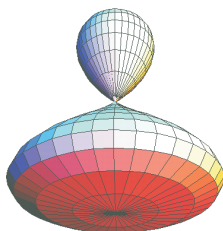
Cisoidna pratilica definira se kao ploha za koju vrijedi:

$$\text{pursuit } \chi_1[\varphi, \psi][u, v] := \varphi[u, v] + \psi[u, v]$$

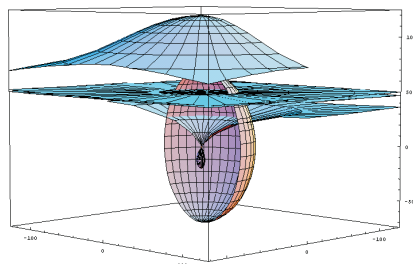
Za dvije zadane plohe φ i ψ , cisoidna ploha i cisoidna pratilica istog su reda i sadrže istu beskonačno daleku krivulju. Cisoidnim postupkom izvođenja mogu se dobiti nepravčaste cisoidne plohe 4. reda (s jednom realnom singularnom točkom) ako pol izvođenja nije na polaznoj plohi. Pol je singularna točka (čvor) i vrh tangencijalnog stošca plohe [9]. Ukoliko za polazne plohe ne biramo kuglu, izvedene kvartike neće biti cirkularne ni bicirkularne. Samo jedan sustav kružnica na plohi možemo postići, ako biramo rotacijske, koaksijalne polazne plohe (sl.5 i 6) i pol na njihovoj osi.



Slika 5.
Elipsoid i ravnina

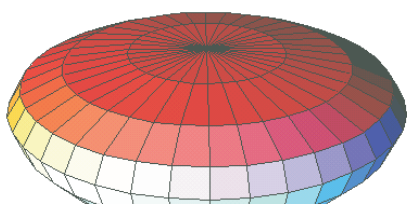


Slika 6.
Cisoidna ploha



Slika 7.
Dvije grane cisoidne plohe

Primjer na sl. 5 je nastanak rotacijske jednodjelne cisoidne plohe (sl. 6) iz elipsoida i ravnine, za pol izvan elipsoida. Na sl. 7 je dvodjelna kvartika elipsoida i ravnine, za pol unutar elipsoida [10]. Gornja grana plohe može natkrivati neki objekt (na pr. paviljon za tržnicu). Podsjeća na limom pokrivene objekte tradicionalne arhitekture (Počitelj, Stolac). Donja grana plohe može biti podgled natkrivenog perona ili parkirališta, gdje je oborinska odvodnja riješena kroz stupove koji nose konstrukciju. Za kupole i slične dijelove objekta, može se izabrati oblik dijela kvartike sa sl. 6, od najšire paralele do singularne točke. Šira strana plohe (sl. 8), do najšire paralele, mogla bi se upotrijebiti za natkrivanje bazena (poput primjera na sl. 9).



Slika 8. *Šira strana izvedene plohe*

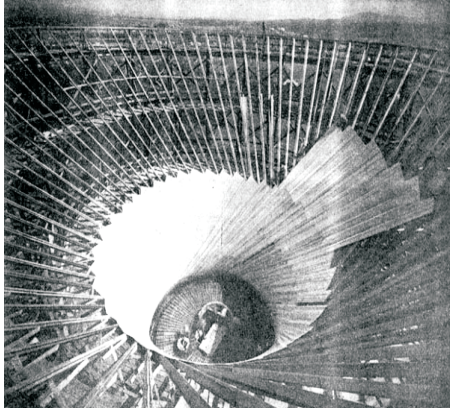


Slika 9. *Natkrivanje bazena*

4. Pravčaste plohe

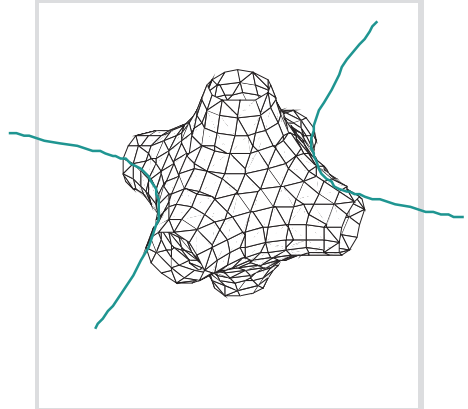
Za razliku od kvadraka (2.reda), plohe višeg reda mogu imati samo jedan sustav izvodnica, pa tada nije moguće na objektu imati mrežu ravnih nosivih elemenata, koji se sijeku. Dva skupa izvodnica postoje samo na pravčastim vitoperim kvadrikama: jednograni hiperboloid (Sl. 10), hiperbolički paraboloid [11]. Najjednostavnije krivulje koje možemo naći na nepravčastim kvartikama

općenito, su konike: Ravninski presjeci neke kvartike su krivulje 4. reda, koje u nekim ravninama mogu biti raspadnute na dvije konike. Primjer je ploha na sl. 11, koja može biti primijenjena kao detalj spajanja neke prostorne rešetke.



Slika 10.

Dva sustava izvodnica hiperboloida



Slika 11.

Kvartika $x^2y^2 + x^2z^2 + y^2z^2 = 1$

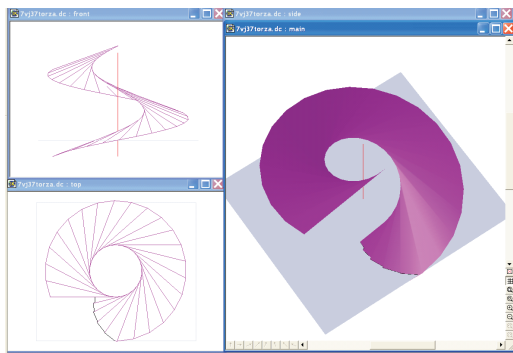
Pravčaste plohe koje se mogu modelirati uz pomoć CAD-a regularne su plohe parametarskog oblika: $x(u,v)=l(u)+v k(u)$, gdje je $0 \leq u \leq 1$ and $0 \leq v \leq 1$. Krivulje $l(u)$ i $k(u)$ (parametrizirane) mogu predstavljati rub onog dijela plohe, koji će biti linearno interpoliran (pravcima). Prva derivacija krivulje l neka nije nula. Ovako dobiveni dio plohe zove se “ruled patch”. CAD-om nije moguće točno modelirati složenije pravčaste plohe, pa treba naći metode kako postaviti rubne uvjete za dio plohe koji se može točno modelirati. Gaussova zakrivljenost vitopere pravčaste plohe je nepozitivna u svakoj točki. Kad modeliramo plohu koja ima dvije grane ili dvostruki pravac u konačnosti na jednoj grani plohe, u CAD–u treba modelirati dio po dio plohe.

4.1. Developabilnost

Pravčaste plohe bilo kojeg reda, mogu biti vitopere, tj. nedevelopabilne (nerazvojne), kod kojih su dvije beskonačno bliske izvodnice mimoilazne ili razvojne, kojima se izvodnice sijeku. U nedevelopabilne spadaju konoidi, koje karakterizira postojanje jedne beskonačno daleke ravnalice, pa im stoga izvodnice leže u pramenu paralelnih ravnina.

Razvojne plohe nastaju kao geometrijsko mjesto tangenata jedne prostorne krivulje a u graditeljstvu su pogodne za pokrivanje limovima i drugim savitljivim, nerastezljivim materijalima.

Developabilne plohe (torze, primjer je na sl. 12) su pravčaste plohe s mnogim važnim svojstvima. U modernom graditeljstvu, slobodan izbor formi interesantan je izazov ali troškovi izgradnje tada znaju doseći ekstremne iznose. Uporabom razvojnih ploha, troškove možemo znatno smanjiti. Model takve plohe može se jednostavno napraviti od ravnih nerastezljivih materijala (lima). CAD-om se također lakše i točnije modeliraju razvojne plohe, dok kod neravojnih može doći do problema i aproksimacija.



Slika 12.

Zavojna torza (developabilna)



Slika 13.

Izvodnice nerazvojne plohe

Atraktivne su i zavojne pravčaste plohe (vitopere i razvojne) ali to su transcendentne plohe, reda $n=\infty$, pa ne spadaju u kvartike. Primjer primjene na sl. 13 pokazuje nosive elemente u smjeru mimoilaznih izvodnica kose zavojne pravčaste plohe. Helikoid je zavojna pravčasta ploha čije su izvodnice paralelne s jednom direkcijom ravninom, pa je to konoid reda $n=\infty$. Stalno je u primjeni, kod zavojnog stubišta.

4.2. Tvorba i svojstva pravčastih kvartika

Neka su dane tri krivulje – ravnalice, po kojima klizi pravac (izvodnica), izvođeći plohu. Pravčasta ploha je skup svih zajedničkih transverzala triju ravnalica, koje pri izvođenju kvartika, trebaju biti konike i pravci.

Pravčaste plohe imaju posebno istaknute dvostruke i torzalne pravce. Torzalni pravac je izvodnica plohe a nastaje u ravnini koja prolazi ravnalicom-pravcem i tangira drugu ravnalicu-koniku (pravci t_1 do t_4 na sl. 14). Tu se, ustvari, dvije beskonačno bliske izvodnice sijeku. Sjecište tih izvodnica je tzv. kuspidalna točka plohe.

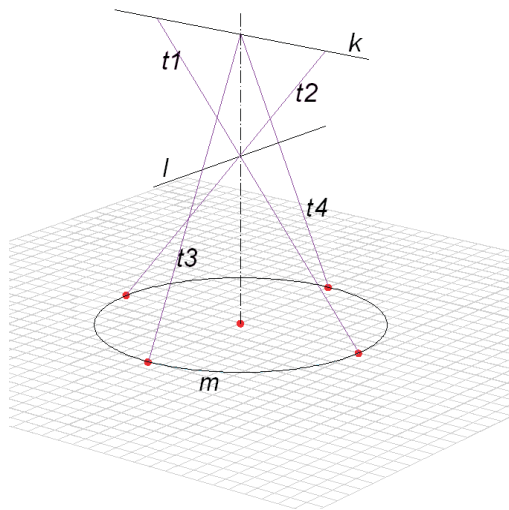
Za sve točke torzalne izvodnice, ploha ima jednu te istu dirnu ravninu. To je torzalna ravnina plohe.

4.3. Red pravčaste plohe

Pravčasta ploha ima jednak red i razred, prema tome ima stupanj. Red plohe lako se izračuna: Ako su ravnalice k , l i m tri krivulje reda n_1 , n_2 , n_3 i ne sijeku se, red pravčaste plohe je $n=2n_1n_2n_3$.

Ako se dvije ravnalice sijeku u točki, nastaje stožac reda treće ravnalice i ostatak plohe, tako da je suma reda jednaka n . Kao izvedenu pravčastu plohu, promatramo dio koji ostaje kad izuzmemo takve stošce. Dakle, red plohe je manji:

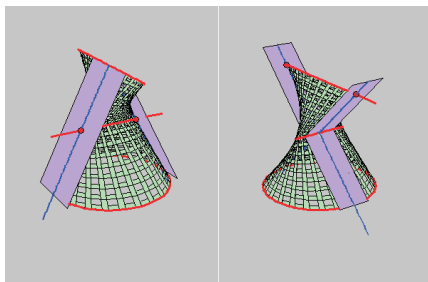
Ako se ravnalice k , l i m (reda n_1 , n_2 , n_3) sijeku, i to: l i m u a točaka, k i m u b te k i l u c točaka, tada je red pravčaste plohe: $n=2n_1n_2n_3 - (an_1+bn_2+cn_3)$



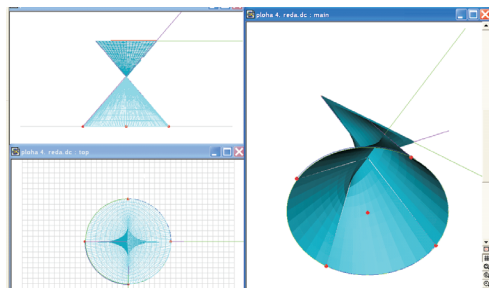
Slika 14. Ravnalice plohe

4.4. Pravčaste kvartike

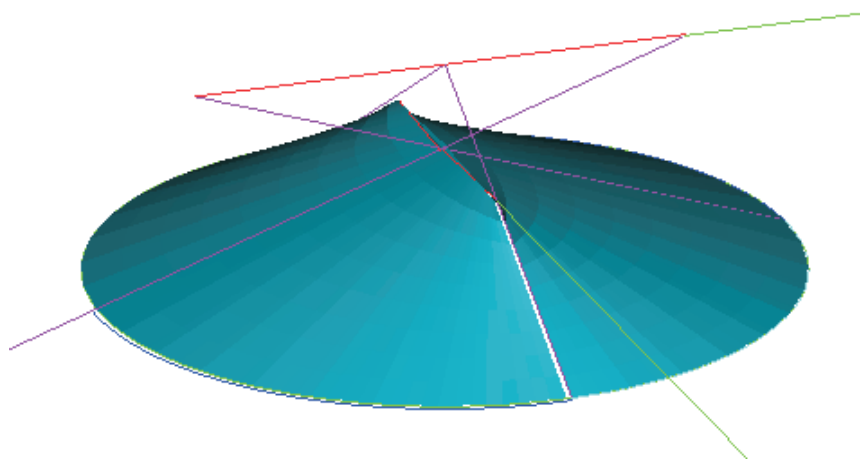
Kad su ravnalice mimoilazni pravci i konika te se ne sijeku, nastaje jedna ploha 4. reda. Za ravnalice na sl. 14 ploha ima 4 torzalne ravnine i dva dvostruka pravca (sl. 15). U Mathematici [15] se može postići savršen model plohe, koju je teško točno modelirati CAD-om. Sl. 16 prikazuje model s (neprimjetnim) odstupanjima u gornjem dijelu. Donji dio ploha mogao bi se primijeniti kao forma krova neke dvorane (Sl. 16 a).

**Slika 15.**

Pravčasta kvartika, projekt [4]

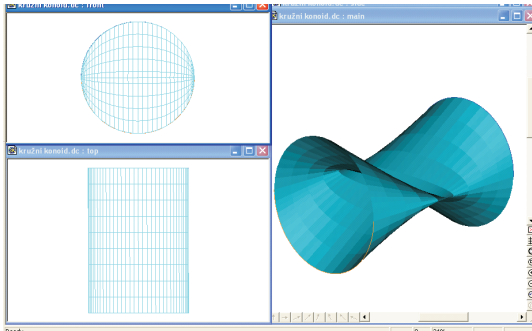
**Slika 16.**

CAD model, pogled odozdo

**Slika 16.a.** *Krov dvorane*

Jednostavnije za primjenu, plohe kojima su izvodnice složene u paralelnim ravninama, nastaju kad jedna od pravčastih ravnalica postane beskonačno daleki pravac. To su *konoidi*, primjenjivani čak u klasičnom, primorskom graditeljstvu: kao svod koji mijenja profil od kružnog do eliptičkog. Kružni konoid ima za ravnalicu kružnicu (sl. 17). U ravninama paralelnim s kružnicom ploha ima elipse (sl. 17), pa se primjenjivala za svod ulaza u gradske zidine ili prolaza ispod zgrade, kod strmih uličica. Ploha ima u konačnosti dvostruki pravac (sl. 17). Industrijske hale mogu se natkrivati gornjim dijelom ove plohe (sl. 19.) između kružnice i pravca plohe, ponovljenim više puta.

U modernoj arhitekturi gotovo svaka ploha mogla bi se primijeniti. (sl. 18)

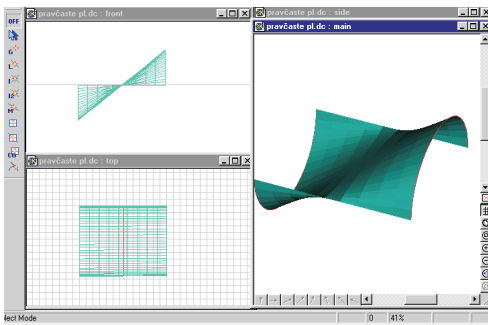


Slika 17.
Pravčasta kvartika – kružni konoid

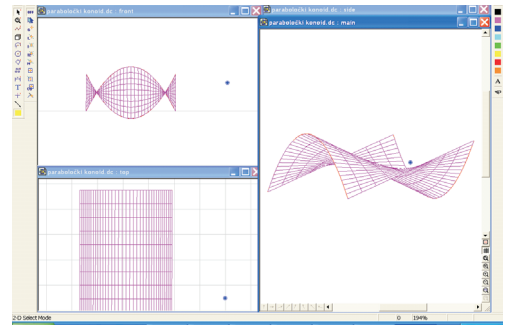


Slika 18.
Arhitektura Praga

Za velike strehe nad peronom ili ulazom, primjenu nalazi parabolički konoid (sl. 20) ali može i pokrivati cijelu građevinu (Sl.21).

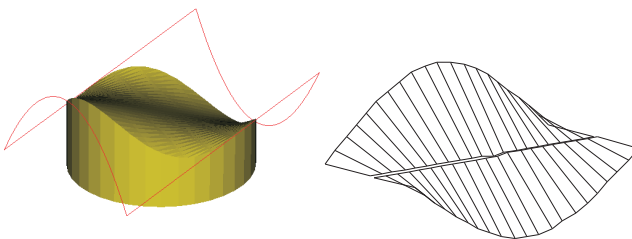


Slika 19.
Kružni konoid



Slika 20.
Parabolički konoid

Premda su konoidi vitopere plohe, krovovi u obliku konoida pokrivaju se limovima i to u trakama (aproksimacije plohe), kao na sl. 22 [16].



Slika 21.
Dio paraboličkog konoida kao krov



Slika 22.
Prospekt firme "Rheinzink"

Zanimljivo je napomenuti da i pravčaste plohe imaju kružne točke, ali kao izolirane točke [8]. Naime, dirna ravnina plohe u kružnoj točki paralelna je s ravninama kružnih presjeka plohe. Na konoidima 4. reda broj kružnica (i izoliranih kružnih točaka) ne može biti veći od dva (kao na sl. 17).

5. Zaključak

Mnogo je ploha 4. reda koje po svojim svojstvima mogu naći primjenu u graditeljstvu. Prednost im je ako se ta svojstva mogu poštivati pri modeliranju CAD-om jer tada nema potrebe za aproksimativnim modelom. Interdisciplinarni pristup problematici primjene ploha može dovesti do fleksibilnijeg i boljeg rješavanja prostornih problema pri oblikovanju konstrukcija. Oblike plohe u primjeni nekad zahtijeva mehanika, kinematika (posebno u strojarstvu), nekad deformabilnost lagane konstrukcije a nekad funkcionalnost i slično. Razni su tehnički zahtjevi a s druge strane najrazličitiji oblici i svojstva ploha, koji se mogu povezati.

Literatura

- [1] H. Brauner, W. Kickingner. *Geometrija u graditeljstvu*. Školska knjiga Zagreb, 1980.
- [2] M. Berger. *Geometry II*. Springer – Velag Berlin 1996.
- [3] A. Gray: *Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces*. CRC Press, Inc. 2000 Corporate Blvd. NW. Boca Raton, Florida 1993.
- [4] S. Gorjanc, V. Benić, J. Beban Brkić, V. Čuljak, L. Pletenac. IT projekt MZT: *Odabrana poglavlja geometrije i matematike za buduće inženjere pomoću programskog sustava Mathematica*, 2002/03.
- [5] B. Kučinić i suradnici. *Oble forme u graditeljstvu*. Građeviar, Zagreb 1992.
- [6] V. Niče. Cisoidalne plohe ravnine i kugle, njihove pratilice i neke njihove generalizacije, “*Rad*” JAZU, 1955.
- [7] V. Niče. *Uvod u sintetičku geometriju*, Školska knjiga Zagreb 1965.
- [8] V. Niče. Izolirane kružne točke na pravčastim plohama 3. i 4. reda, “*Rad*” JAZU, tom 292, p 193- 222.
- [9] L. Pletenac. Cisoidne plohe u Mathematici. prezentirano u vidu postera na međunarodnom znanstveno-stručnom skupu *PrimMath 2001*, Zagreb, rujan 2001. (sažetak)

-
- [10] L. Pletenac. Necirkularne cisoidne krivulje i plohe. *Proceedings 7. Znanstveno-stručni kolokvij Hrvatskog društva za konstruktivnu geometriju i kompjutorsku grafiku HDKGIKG*, Zagreb, Rujan 2001.
- [11] L. Pletenac. Hipar -aproksimacija minimalne plope. *KoG Broj 6*, Zagreb, 2002. (str.88.- 89.)
- [12] L. Pletenac. Central inversion on quadrics. Proceedings “*Konstruktive geometry*”, Balaton, rujan 1995.
- [13] A.A. Savelov. *Ravninske krivulje*, Školska knjiga, Zagreb, 1979.
- [14] H. Wieleitner. *Spezielle ebene Kurven*, Sammlung Schubert LVI, Leipzig, 1909.
- [15] S. Wolfram. *Mathematica*, Addison –Wesly Publishing Company, 1993.
- [16] Rheinzink GmbH & Co. KG. *Prospekt*

Primjena vezane interpolacije na konačne elemente Mindlinovih ploča

Application of linked interpolation to Mindlin plate finite elements

Dragan Ribarić, Edita Papa, Gordan Jelenić

Sažetak. U ovome radu analizira se upotreba vezane interpolacije pri proračunu pločastih nosača metodom konačnih elemenata. Prednosti vezane interpolacije dobro su poznate i jasno uočljive kod konačnih elemenata Timošenkovih (debelih) greda i u ovome radu polazimo od analogije između te teorije i Mindlinove teorije pločastih nosača i primijenjujemo koncept vezane interpolacije na konačne elemente debelih ploča.

Za razliku od grednih nosača, vezana interpolacija kod pločastih nosača nije u mogućnosti reproducirati analitičko rješenje čak niti za relativno jednostavne slučajeve opterećenja i u ovome radu usporedit će se postupci i rezultati dobiveni na ovaj način s postupcima i rezultatima u literaturi. U numeričkim primjerima analizirat će se efekt progušćivanja mreže konačnih elemenata.

Ključne riječi: metoda konačnih elemenata, Mindlinova teorija ploča, vezana interpolacija

Abstract. In this work the use of linked interpolation in the design of plate structures using the finite elements is analysed. Benefits of the linked interpolation are very obvious and well known in the Timoshenko (thick) beam finite elements and the basis for the development of a family of the Mindlin plate elements presented in this paper is found in the analogy between the Timoshenko beam theory and the Mindlin plate theory.

In contrast to beams, the linked interpolation in plate elements cannot completely reproduce the analytical solution, not even for the relatively simple load cases. The results obtained in this way will be compared and numerically assessed against the reference results from literature using various mesh densities.

Key words: finite element method, Mindlin beam theory, linked interpolation

1. Uvod

Ozbiljan problem koji se javlja kod numeričke analize Timošenkovih (visokih) greda i Mindlin-Reissnerovih ploča, kod kojih se u obzir uzima i utjecaj poprečnih sila na deformaciju, jest *shear locking* ili fenomen blokiranja zbog utjecaja poprečnih sila [1]. Uz običnu deformaciju poprečnog presjeka od savijanja, naime, doprinos poprečne sile očituje se i u klizanju poprečnog presjeka zbog čega poprečni presjek više ne ostaje okomit na težišnu plohu. Ukoliko ovaj efekt nije propisno tretiran, promatrani element dobiva umjetnu krutost što rezultira iznimno malenim vrijednostima pomaka. Ovaj problem moguće je umanjiti ili riješiti smanjenjem točnosti integriranja pojedinih elemenata matrice krutosti (reducirana integracija) [2-4], povećanjem stupnja interpolacijskih Lagrangeovih polinoma [2-4], lokalnom interpolacijom presječnih sila (miješana metoda) [5-10] ili upotrebom novih interpolacijskih funkcija koje povisuju stupanj interpolacijskih polinoma bez dodavanja dodatnih čvorova na konačnom elementu [1,3,5,6,8,9,11,12]. Primjenom zadnje od navedenih tehnika prepoznaje se utjecaj rotacija na poprečne pomake na razini definiranja interpolacijskih funkcija i u ovome radu ona će se detaljnije analizirati. Ovakvu interpolaciju nazivamo *vezanom interpolacijom* (linked interpolation).

Potrebno je uočiti da, za razliku od grednih problema, analitički točnoga rješenja uz pomoć konačnog broja parametara za problem ploča nema, čime je onemogućeno dobivanje analitičkoga rezultata metodom konačnih elemenata. Ipak, vještim odabirom interpolacijskih funkcija želimo se maksimalno približiti ovome rješenju, uz najmanji mogući računski napor. U ovome radu međusobno će se usporediti rezultati dobiveni različitim konačnim elementima iz familije elemenata s vezanom interpolacijom za pomake i rotacije.

U 2. poglavlju ovoga rada ukratko izlažemo Mindlinovu teoriju debelih ploča, gdje dajemo naglasak na definiranju deformacijske energije i rada vanjskih sila, što omogućava standardnu primjenu metode konačnih elemenata. U 3. poglavlju predstavljamo standardne Lagrangeve interpolacijske funkcije za potpun opis linearne i kvadratne promjene traženih veličina (pomaka i rotacija), koje u 4. poglavlju koristimo kao osnovu za razvoj kvadratne i kubne vezane interpolacije na način inspiriran našim prethodnim radom na grednim nosačima [11,13,14]. U 5. poglavlju predstavljamo nekoliko mogućih varijanti najjednostavnijega elementa iz familije elemenata s vezanom interpolacijom, kod kojega je pomak opisan bikkvadratnom interpolacijom ovisnom o čvornim pomacima i rotacijama, od kojih je jedna preuzeta iz literature [6]. U 6. poglavlju analiziramo ponašanje predstavljenih konačnih elemenata na standardnim testnim primjerima, a u 7. poglavlju izvodimo zaključke i predlažemo smjernice za daljnji rad.

2. Mindlinova teorija debelih ploča

Osnovna razlika između teorija tankih i debelih ploča jest u tome što se kod debelih (visokih) ploča uzimaju u obzir posmične deformacije. Prema Mindlinovoj teoriji debelih ploča normale na srednju plohu prije deformacije ostaju ravne, ali ne i okomite na srednju plohu nakon deformacije (razlika u odnosu na tanke ploče kod kojih vrijedi Kirchhoffova teorija), dok su naprezanja ortogonalna na srednju plohu zanemariva u odnosu na opterećenje ($\sigma_{zz} = 0$) [2]. Kinematičke i deformacijske veličine, opterećenje i koordinatne osi prikazani su na Slici 1.

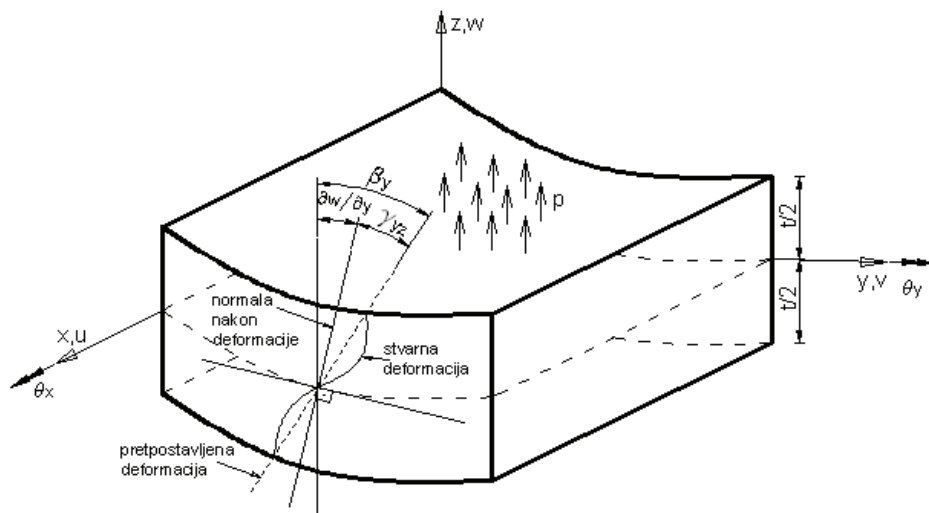
Kod debelih ploča, ukupnu rotaciju β_y čine rotacija uslijed savijanja $\partial w / \partial y$ i posmična deformacija γ_{yz} (deformacija od klizanja). Kao nepoznate veličine u svakom čvoru javljaju se pomak w i dva kuta zaokreta β_x i β_y . Kut β_x djeluje tako da savija poprečni presjek u smjeru osi x , dok kut β_y djeluje na način da savija poprečni presjek u smjeru osi y .

2.1. Veza naprezanja i deformacija

Komponente pomaka neke točke T s koordinatama (x, y, z) prema teoriji malih pomaka su:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} z\beta_x(x, y) \\ z\beta_y(x, y) \\ w(x, y) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

gdje je w poprečni pomak, a $\beta_x = \theta_y$ i $\beta_y = -\theta_x$ su rotacije normale na središnju plohu uslijed kojih dolazi do pomicanja materijalnih točaka na normali duž odgovarajuće koordinatne osi proporcionalno njihovoj udaljenosti od središnje plohe. Deformacije od savijanja ε_{xx} , ε_{yy} i γ_{xy} se mijenjaju linearno po visini ploče, a posmične deformacije γ_{xz} i γ_{yz} su konstantne po visini ploče.



Slika 1. Zaokret poprečnog presjeka debele ploče. Vidljiv je doprinos poprečne sile, što se očituje u klizanju poprečnog presjeka.

Stanje naprezanja u ploči dobivamo iz uvjeta da je $\sigma_z = 0$, pa je veza između naprezanja i deformacija dana na sljedeći način:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \mathbf{k}_1 \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \frac{E}{2(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \mathbf{k}_2 \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

pri čemu su σ_{xx} i σ_{yy} komponente normalnih naprezanja, a τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz} su komponente posmičnih naprezanja. Također, ν je Poissonov koeficijent, a E je modul elastičnosti materijala.

2.2. Potencijalna energija deformacija

Ukupna potencijalna energija deformacija jednaka je zbroju potencijalne energije od savijanja (ϕ_1) i potencijalne energije od klizanja odnosno smicanja (ϕ_2). Preko izraza za potencijalnu energiju deformacija, dobit ćemo izraz za matricu krutosti. Potencijalna energija deformacija jest

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (4)$$

gdje je

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{1}{2} \int_{A-t/2}^{t/2} \int_{A-t/2}^{t/2} \langle \varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{yy} \quad \gamma_{xy} \rangle \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} dz dA = \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\kappa} \boldsymbol{\varepsilon} dV \\ &= \frac{1}{2} \int_{A-t/2}^{t/2} \int_{A-t/2}^{t/2} \mathbf{u}^T \mathbf{D}_1 \boldsymbol{\kappa}_1 \mathbf{D}_1^T \mathbf{u} z^2 dz dA = \frac{1}{2} \int_{A-t/2}^{t/2} \int_{A-t/2}^{t/2} \boldsymbol{\rho}^T \mathbf{N}^T \mathbf{D}_1 \boldsymbol{\kappa}_1 \mathbf{D}_1^T \mathbf{N} \boldsymbol{\rho} z^2 dz dA \\ &= \frac{1}{2} \int_A \boldsymbol{\rho}^T \mathbf{B}_1^T \boldsymbol{\kappa}_{1p} \mathbf{B}_1 \boldsymbol{\rho} dA = \frac{1}{2} \boldsymbol{\rho}^T \mathbf{K}_1 \boldsymbol{\rho} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \varphi_2 &= \int_{A-t/2}^{t/2} \int_{A-t/2}^{t/2} \langle \gamma_{yz} \quad \gamma_{xz} \rangle \frac{E k}{2(1+\nu)} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} dz dA = \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\kappa} \boldsymbol{\varepsilon} dV = \\ &= \frac{1}{2} \int_{A-t/2}^{t/2} \int_{A-t/2}^{t/2} \mathbf{u}^T \mathbf{D}_2 \boldsymbol{\kappa}_2 \mathbf{D}_2^T \mathbf{u} z^2 dz dA = \frac{1}{2} \int_{A-t/2}^{t/2} \int_{A-t/2}^{t/2} \boldsymbol{\rho}^T \mathbf{N}^T \mathbf{D}_2 \boldsymbol{\kappa}_2 \mathbf{D}_2^T \mathbf{N} \boldsymbol{\rho} z^2 dz dA \\ &= \frac{1}{2} \int_A \boldsymbol{\rho}^T \mathbf{B}_2^T \boldsymbol{\kappa}_{2p} \mathbf{B}_2 \boldsymbol{\rho} dA = \frac{1}{2} \boldsymbol{\rho}^T \mathbf{K}_2 \boldsymbol{\rho} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_1 &= \mathbf{D}_1^T \mathbf{N} \\ \mathbf{B}_2 &= \mathbf{D}_2^T \mathbf{N} \\ \mathbf{K}_1 &= \int_0^a \int_0^b \mathbf{B}_1^T \boldsymbol{\kappa}_{1p} \mathbf{B}_1 dx dy \\ \mathbf{K}_2 &= \int_0^a \int_0^b \mathbf{B}_2^T \boldsymbol{\kappa}_{2p} \mathbf{B}_2 dx dy \\ \varphi &= \frac{1}{2} \boldsymbol{\rho}^T (\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2) \boldsymbol{\rho} \end{aligned} \quad (7)$$

gdje je \mathbf{N} matrica funkcija oblika, kojom je definiran oblik nepoznatih funkcija pomaka i rotacija središnje plohe ploče u ovisnosti o traženim čvornim vrijednostima pomaka i rotacija. U \mathbf{B} matrici su dane odgovarajuće derivacije funkcija oblika, a $\boldsymbol{\kappa}_{1p}$ i $\boldsymbol{\kappa}_{2p}$ su konstitutivne matrice ploče, dane sljedećim izrazima:

$$\mathbf{K}_{1p} = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_{2p} = \frac{Et k}{2(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

\mathbf{D}_1 i \mathbf{D}_2 su matrice diferencijalnih operatora

$$\mathbf{D}_1^T = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_2^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial y} & 0 & -1 \\ \frac{\partial}{\partial x} & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

a koeficijentom k se uzima u obzir nejednolikost posmičnih naprezanja i najčešće se uzima da je jednak 5/6 [2].

Također, u gornjim izrazima V je volumen ploče određen površinom težišne plohe A i visinom ploče t , a je dimenzija pločastog nosača u smjeru koordinatne osi x , b je dimenzija pločastog nosača u smjeru osi y , \mathbf{K}_1 je matrica krutosti uslijed savijanja, \mathbf{K}_2 je matrica krutosti uslijed smicanja, a ρ je vektor osnovnih nepoznanica našega problema, koji sadrži pomake i rotacije u odabranim čvornim točkama.

2.3. Presječne sile

Presječne sile su dane preko sljedećih izraza:

$$\mathbf{M} = \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \int \sigma_x z dz \\ \int \sigma_y z dz \\ \int \tau_{xy} z dz \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{Bmatrix} Q_x \\ Q_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \int \tau_{xz} dz \\ \int \tau_{yz} dz \end{Bmatrix} \quad (10)$$

$$M_x = -\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \left[\frac{\partial \beta_x}{\partial x} + \nu \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \right]$$

$$M_y = -\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \left[\frac{\partial \beta_y}{\partial y} + \nu \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \right] \quad (11)$$

$$M_{xy} = -\frac{Et^3}{24(1+\nu)} \left[\frac{\partial \beta_x}{\partial y} + \frac{\partial \beta_y}{\partial x} \right] = -\frac{Gt^3}{12} \left[\frac{\partial \beta_x}{\partial y} + \frac{\partial \beta_y}{\partial x} \right]$$

$$\begin{aligned}
 Q_x &= \frac{Et}{2(1+\nu)} \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \beta_x \right) \\
 Q_y &= \frac{Et}{2(1+\nu)} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \beta_y \right)
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

gdje je M_x moment savijanja u smjeru osi x , M_y je moment savijanja u smjeru osi y , M_{xy} je torzijski moment, Q_x i Q_y su poprečne sile u smjeru x , odnosno y osi, a G je modul smika.

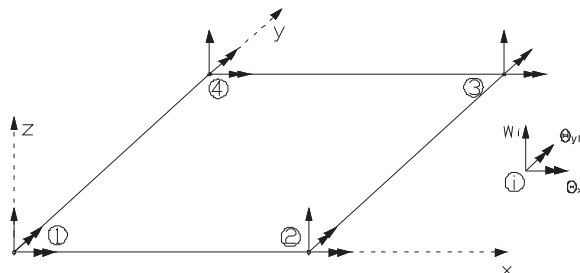
3. Lagrangeve interpolacijske funkcije

Ključni korak u primjeni metode konačnih elemenata jest definiranje načina raspodjele nepoznatih funkcija u ovisnosti o vrijednostima nepoznatih veličina u unaprijed odabranim čvorovima. Položaj i karakter čvora (njegovo svojstvo da su u njemu kao nepoznate veličine definirani pomaci, rotacije ili oboje) te oblik funkcije kojom se pretpostavlja raspodjela nepoznatih veličina po središnjoj plohi je stvar odabira prilikom definiranja konačnog elementa.

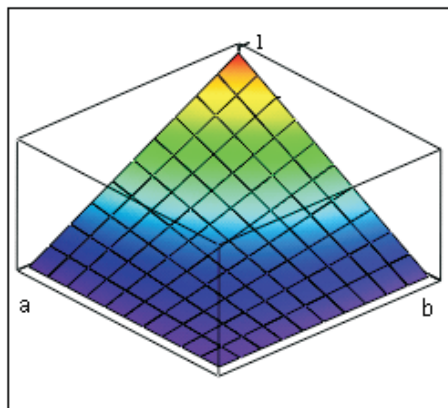
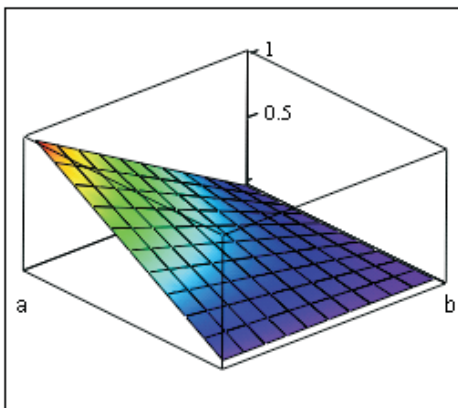
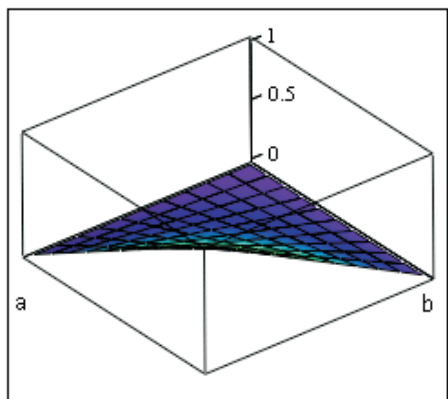
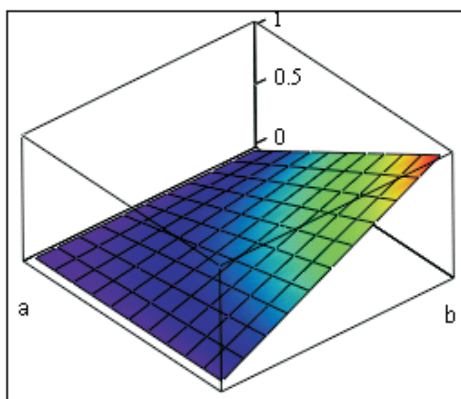
3.1. Linearni pločasti konačni element (4 čvora)

Jedan od najjednostavnijih konačnih elemenata jest četveročvorni element prikazan na Slici 2, u kojem su kao nepoznate čvorne veličine odabrane vrijednosti pomaka i rotacija u uglovima četverokutnoga segmenta središnje plohe ploče, za koje je pretpostavljeno da se po elementu mijenjaju bilinearно, što je najjednostavnije opisati primjenom Lagrangevih polinoma.

Svojstvo Lagrangeovih interpolacijskih funkcija jest da je njihova vrijednost u promatranom čvoru jednaka jedinici, a u svim ostalim čvorovima je jednaka nuli. U slučaju visokih (Mindlinovih) ploča, nije neuobičajeno da se iste funkcije upotrebljavaju za pomake i rotacije budući da između tih veličina nema jednoznačne veze koja postoji kod tankih (Kirchhoffovih) ploča.



Slika 2. Četveročvorni konačni element ploče i njegovi stupnjevi slobode.

 N_1  N_2  N_3  N_4

Slika 3. Grafički prikaz funkcija $N_1 - N_4$. Čvorovi su numerirani u smjeru suprotnom od kazaljke na satu počevši od ishodišta koordinatnog sustava.

Bilinearne interpolacijske funkcije prikazane su na Slici 3, a imaju sljedeći oblik:

$$N_1 = 1 - \frac{x}{a} - \frac{y}{b} + \frac{xy}{ab}, \quad N_2 = \frac{x}{a} - \frac{xy}{ab}, \quad N_3 = \frac{xy}{ab}, \quad N_4 = \frac{y}{b} - \frac{xy}{ab} \quad (13)$$

Raspodjela pomaka i rotacija po središnjoj plohi elementa je prema tome

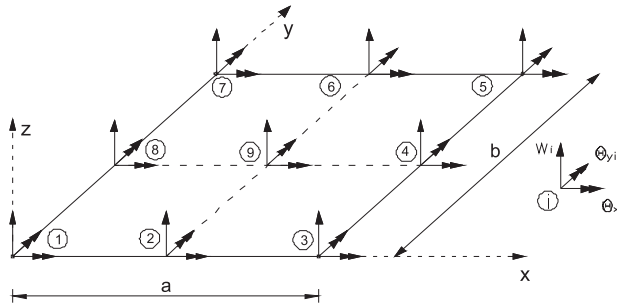
$$\begin{Bmatrix} w \\ \theta_x \\ \theta_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \boldsymbol{\rho} \quad (14)$$

gdje je ρ vektor čvornih nepoznanica

$$\rho^{-T} = \left\langle w_1 \ \theta_{x1} \ \theta_{y1} \ w_2 \ \theta_{x2} \ \theta_{y2} \ w_3 \ \theta_{x3} \ \theta_{y3} \ w_4 \ \theta_{x4} \ \theta_{y4} \right\rangle. \quad (15)$$

3.2. Četverokutni pločasti konačni element (9 čvorova)

Na sličan način možemo definirati i bikvadratni element sa devet čvorova (Slika 4), u kojem su kao nepoznate čvrne veličine ponovo odabrane vrijednosti pomaka i rotacija u uglovima, ali osim toga još i u središtima stranica te u samome geometrijskome središtu četverokutnoga segmenta središnje plohe ploče.



Slika 4. Stupnjevi slobode četverokutnog pločastog konačnog elementa.

Pretpostavljeno je da se nepoznate veličine po elementu sada mijenjaju bikvadratno, što također možemo izraziti odgovarajućim Lagrangevim polinomima. Neke od Lagrangeovih interpolacijskih funkcija za element prikazan na slici 4 su:

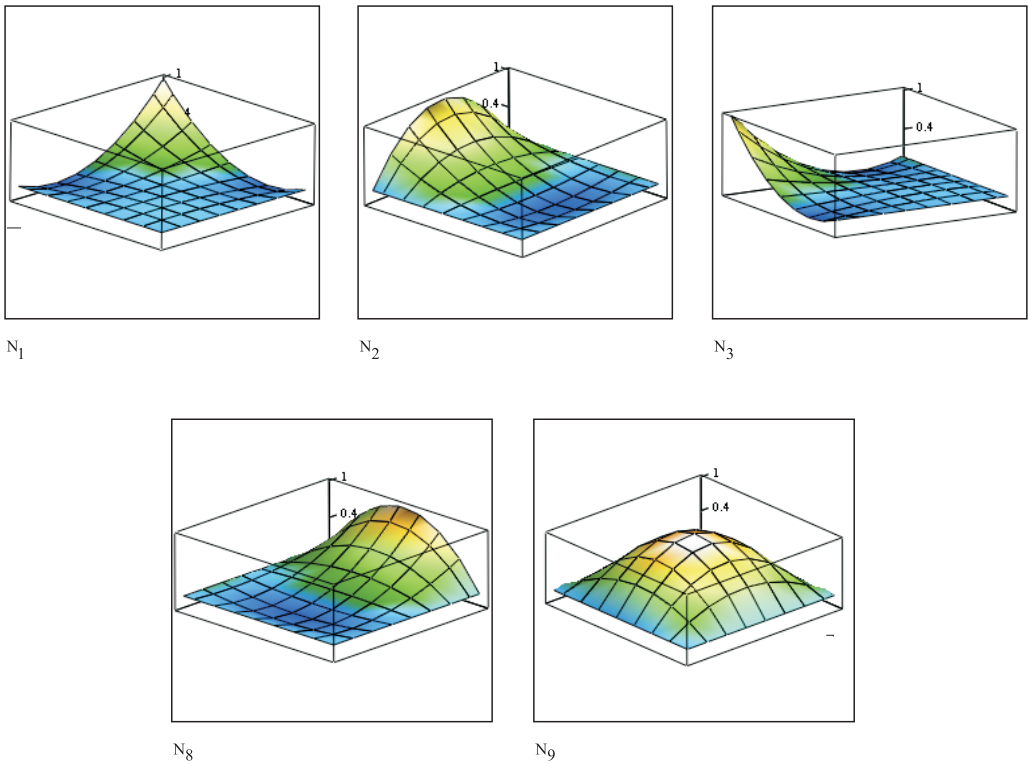
$$\begin{aligned} N_1(x, y) &= 1 - 3\frac{x}{a} - 3\frac{y}{b} + 2\frac{x^2}{a^2} + 9\frac{xy}{ab} + 2\frac{y^2}{b^2} - 6\frac{x^2y}{a^2b} - 6\frac{xy^2}{ab^2} + 4\frac{x^2y^2}{a^2b^2} \\ N_2(x, y) &= 4\frac{x}{a} - 4\frac{x^2}{a^2} - 12\frac{xy}{ab} + 12\frac{x^2y}{a^2b} + 8\frac{xy^2}{ab^2} - 8\frac{x^2y^2}{a^2b^2} \\ N_3(x, y) &= -\frac{x}{a} + 2\frac{x^2}{a^2} + 3\frac{xy}{ab} - 6\frac{x^2y}{a^2b} - 2\frac{xy^2}{ab^2} + 4\frac{x^2y^2}{a^2b^2} \\ &\vdots \\ N_8(x, y) &= 4\frac{y}{b} - 12\frac{xy}{ab} - 4\frac{y^2}{b^2} + 8\frac{x^2y}{a^2b} + 12\frac{xy^2}{ab^2} - 8\frac{x^2y^2}{a^2b^2} \\ N_9(x, y) &= 16\frac{xy}{ab} - 16\frac{x^2y}{a^2b} - 16\frac{xy^2}{ab^2} + 16\frac{x^2y^2}{a^2b^2} \end{aligned} \quad (16)$$

a ilustrirane su na Slici 5. Raspodjela pomaka i rotacija po središnjoj plohi elementa bi u ovome slučaju bila

$$\begin{Bmatrix} w \\ \theta_x \\ \theta_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & \dots & N_9 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & \dots & 0 & N_9 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & \dots & 0 & 0 & N_9 \end{bmatrix} \boldsymbol{\rho} \quad (17)$$

gdje je $\boldsymbol{\rho}$ sada vektor nepoznanica u devet čvornih točaka elementa:

$$\boldsymbol{\rho}^T = \langle w_1 \quad \theta_{x1} \quad \theta_{y1} \quad w_2 \quad \theta_{x2} \quad \theta_{y2} \quad \dots \quad w_9 \quad \theta_{x9} \quad \theta_{y9} \rangle \quad (18)$$

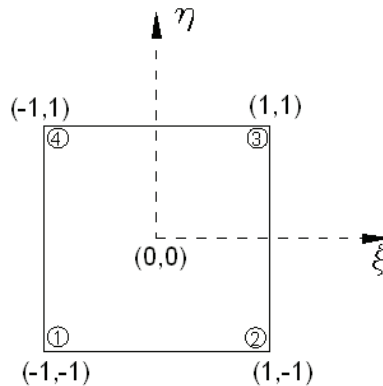


Slika 5. Grafički prikazi polinoma N_1, N_2, N_3, N_8, N_9 .

4. Vezana interpolacija

Vezanom interpolacijom nastoji se uzeti u obzir utjecaj rotacija na pomake Mindlinove ploče na način analogan deformiranju tankih (Kirchhoffovih) ploča, gdje je raspodjela rotacija jednaka odgovarajućoj parcijalnoj derivaciji

funkcije pomaka. Odgovarajuća analogija postoji i između teorija tankih (Euler-Bernoullijevih) i debelih (Timošenkovih) greda [14], a interpolaciju koju na taj način dobivamo kod debelih greda nazivamo vezanom interpolacijom i može se dokazati da ona ima sposobnost potpunoga reproduciranja analitičkih rezultata za polinomsko opterećenje proizvoljnog stupnja [13]. Na sličan način možemo pristupiti i interpolaciji kod Mindlinovih ploča iako, za razliku od Timošenkovih greda, ne postoji interpolacija s konačnim brojem parametara koja može reproducirati analitičke rezultate.



Slika 6. Prirodni koordinatni sustav.

Vezana interpolacija će biti dana u prirodnim koordinatama, prikazanima na Slici 6. Interpolacije za kutove zaokreta još će uvijek biti predstavljene Lagrangeovim polinomima koji su isti za oba kuta. Interpolacije za pomak sastojat će se također od Lagrangeovih polinoma uz dodatak polinoma višeg reda koji uzima u obzir doprinos pomacima zbog zaokretanja. Pomak želimo interpolirati polinomom višeg stupnja od polinoma kojima interpoliramo kutove zaokreta, kako bismo osigurali jednakost derivacija pomaka i kutova zaokreta za granični slučaj tankih ploča

4.1. Vezana interpolacija za četveročvorni konačni element

Općenito, na temelju analogije s vezanom interpolacijom kod greda s dva čvora [3,5,11,13], vezana interpolacija za pomak kod četveročvornog konačnog elementa ploče ima slijedeći oblik:

$$\begin{aligned}
 w = & N^1 w_1 + N^2 w_2 + N^3 w_3 + N^4 w_4 - \frac{1}{2} a K_{\xi}^1 (\theta_{1y} - \theta_{2y}) + \frac{1}{2} a K_{\eta}^1 (\theta_{2x} - \theta_{3x}) \\
 & - \frac{1}{2} a K_{\xi}^2 (\theta_{4y} - \theta_{3y}) + \frac{1}{2} a K_{\eta}^2 (\theta_{1x} - \theta_{4x})
 \end{aligned} \tag{19}$$

gdje je

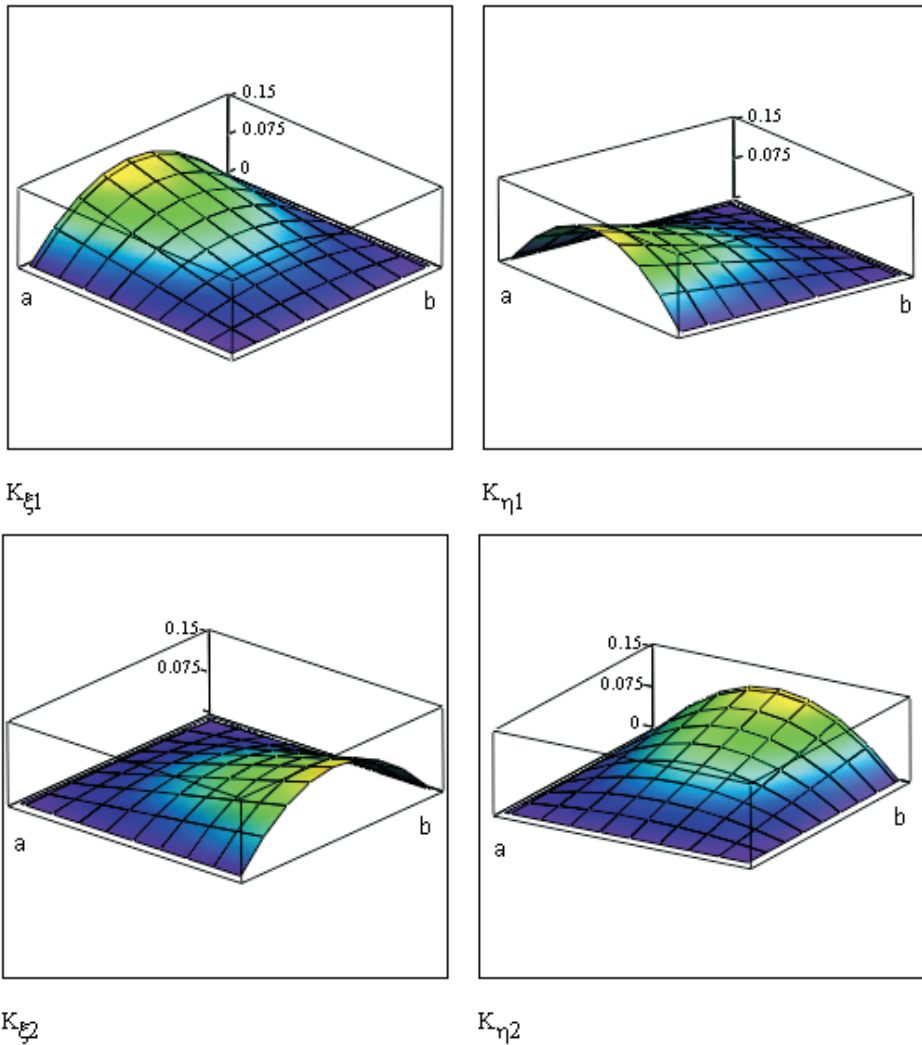
$$\begin{aligned}
 N^1 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) = \frac{1}{2}(1-\xi)\frac{1}{2}(1-\eta) = N_\xi^1 N_\eta^1 \\
 N^2 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) = \frac{1}{2}(1+\xi)\frac{1}{2}(1-\eta) = N_\xi^2 N_\eta^1 \\
 N^3 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta) = \frac{1}{2}(1+\xi)\frac{1}{2}(1+\eta) = N_\xi^2 N_\eta^2 \\
 N^4 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) = \frac{1}{2}(1-\xi)\frac{1}{2}(1+\eta) = N_\xi^1 N_\eta^2
 \end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
 K_\xi^1 &= \frac{1}{8}(1-\xi^2)(1-\eta) = N_\xi^1 N_\eta^1 N_\xi^2 \\
 K_\eta^1 &= \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta^2) = N_\xi^2 N_\eta^1 N_\eta^2 \\
 K_\xi^2 &= \frac{1}{8}(1-\xi^2)(1+\eta) = N_\xi^2 N_\eta^2 N_\xi^1 \\
 K_\eta^2 &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta^2) = N_\xi^1 N_\eta^1 N_\eta^2
 \end{aligned} \tag{21}$$

a funkcije $N_\xi^1, N_\xi^2, N_\eta^1$ i N_η^2 su definirane kao

$$N_\xi^1 = \frac{1}{2}(1-\xi), \quad N_\xi^2 = \frac{1}{2}(1+\xi), \quad N_\eta^1 = \frac{1}{2}(1-\eta), \quad N_\eta^2 = \frac{1}{2}(1+\eta) \tag{22}$$

Funkcije $K_\xi^1, K_\xi^2, K_\eta^1$ i K_η^2 su grafički prikazane na Slici 7.



Slika 7. Grafički prikaz funkcija K_j^i

Vidimo da je ovakvim oblikom funkcija postignuta zakrivljenost prilikom deformiranja linearnog elementa (kod kojeg su geometrija elementa a time i na tradicionalan način definirano polje pomaka opisani preko linearnih funkcija) bez dodavanja dodatnih čvorova na konačnom elementu. Funkcije N_i su prikazane u prethodnom poglavlju na Slici 3.

Provjerimo što se događa u slučaju kada ploču gledamo kao gredu. U tom slučaju, $w_4 = w_1$, $w_3 = w_2$, $\theta_{4y} = \theta_{1y} = \theta_1$, $\theta_{3y} = \theta_{2y} = \theta_2$, $\theta_{1x} = \theta_{2x} = \theta_{3x} = \theta_{4x} = 0$ i gornji izraz za pomak w korištenjem vezane interpolacije postaje

$$w = (N^1 + N^4)w_1 + (N^2 + N^3)w_2 - \frac{1}{2}a(K_\xi^1 + K_\xi^2)(\theta_1 - \theta_2) \quad (23)$$

Pošto je u ovome izrazu $N^1 + N^4 = \frac{1}{2}(1 - \xi) = N_\xi^1$, $N^2 + N^3 = \frac{1}{2}(1 + \xi) = N_\xi^2$

i $K_\xi^1 + K_\xi^2 = \frac{1}{4}(1 - \xi^2) = N_\xi^1 N_\xi^2$, vezana interpolacija se svodi na

$$w = N_\xi^1 w_1 + N_\xi^2 w_2 - \frac{a}{2} N_\xi^1 N_\xi^2 (\theta_1 - \theta_2), \quad (24)$$

odnosno na poznat izraz za vezanu interpolaciju dvočvornog grednog elementa [3,5,11,13,14].

4.2. Vezana interpolacija za konačni element s devet čvorova

Interpolacija pomaka za ovakav element (Slika 8) je dana na slijedeći način:

$$w = I^i w_i - \frac{1}{3} a [K_\xi^1 (\theta_{y1} - 2\theta_{y2} + \theta_{y3}) + K_\xi^2 (\theta_{y8} - 2\theta_{y9} + \theta_{y4}) + K_\xi^3 (\theta_{y7} - 2\theta_{y6} + \theta_{y5})] \\ + \frac{1}{3} b [K_\eta^1 (\theta_{x1} - 2\theta_{x8} + \theta_{x7}) + K_\eta^2 (\theta_{x2} - 2\theta_{x9} + \theta_{x6}) + K_\eta^3 (\theta_{x3} - 2\theta_{x4} + \theta_{x5})] \quad (25)$$

gdje su I_i Lagrangeovi polinomi:

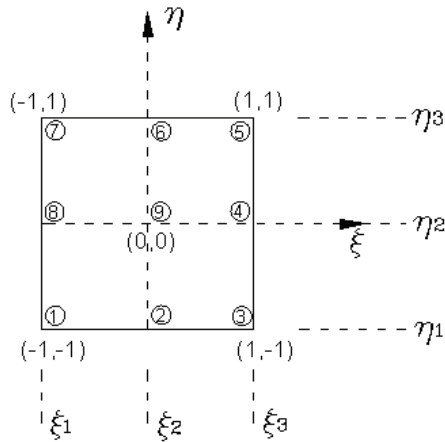
$$\begin{aligned} I^1 &= N_\xi^2 N_\eta^2 N_\xi^3 N_\eta^3 & I^4 &= -4N_\xi^1 N_\eta^1 N_\xi^2 N_\eta^3 & I^7 &= -N_\xi^2 N_\eta^1 N_\xi^3 N_\eta^2 \\ I^2 &= 4N_\xi^1 N_\eta^2 N_\xi^3 N_\eta^3 & I^5 &= N_\xi^1 N_\eta^1 N_\xi^2 N_\eta^2 & I^8 &= 4N_\xi^2 N_\eta^1 N_\xi^3 N_\eta^3 \\ I^3 &= -N_\xi^1 N_\eta^2 N_\xi^2 N_\eta^3 & I^6 &= -4N_\xi^1 N_\eta^1 N_\xi^3 N_\eta^2 & I^9 &= 16N_\xi^1 N_\eta^1 N_\xi^3 N_\eta^3 \end{aligned} \quad (26)$$

funkcije N_j^i su definirane kao

$$N_j^1 = \frac{1}{2}(1 + j), \quad N_j^2 = -j, \quad N_j^3 = \frac{1}{2}(1 - j), \quad j = \xi, \eta, \quad (27)$$

a K_ξ^i i K_η^i su funkcije definirane kao

$$\begin{aligned} K_\xi^1 &= N_\xi^1 N_\xi^2 N_\xi^3 N_\eta^2 N_\eta^3 & K_\eta^1 &= N_\eta^1 N_\eta^2 N_\eta^3 N_\xi^2 N_\xi^3 \\ K_\xi^2 &= -4N_\xi^1 N_\xi^2 N_\xi^3 N_\eta^1 N_\eta^3 & K_\eta^2 &= -4N_\eta^1 N_\eta^2 N_\eta^3 N_\xi^1 N_\xi^3 \\ K_\xi^3 &= N_\xi^1 N_\xi^2 N_\xi^3 N_\eta^1 N_\eta^2 & K_\eta^3 &= N_\eta^1 N_\eta^2 N_\eta^3 N_\xi^1 N_\xi^2 \end{aligned} \quad (28)$$



Slika 8. Konačni element sa devet čvorova u prirodnom koordinatnom sustavu.

Ako ploču promatramo kao gredu, imamo sljedeće: $\theta_{xi} = 0$ i

$$\begin{aligned}
 w_8 &= w_7 = w_1 \\
 w_6 &= w_9 = w_2 \\
 w_5 &= w_4 = w_3
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

te

$$\begin{aligned}
 \theta_{y1} &= \theta_{y8} = \theta_{y7} = \theta_1 \\
 \theta_{y2} &= \theta_{y9} = \theta_{y6} = \theta_2 \\
 \theta_{y3} &= \theta_{y4} = \theta_{y5} = \theta_3
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

iz čega slijedi

$$\begin{aligned}
 w &= (I^1 + I^7 + I^8)w_1 + (I^2 + I^6 + I^9)w_2 + (I^3 + I^4 + I^5)w_3 - \frac{a}{3} \sum_{i=1}^3 K_{\xi}^i (\theta_1 - 2\theta_2 + \theta_3) \\
 I^1 + I^7 + I^8 &= -\frac{\xi}{2} (1 - \xi) = I^1 \text{ kod greda} \\
 I^2 + I^6 + I^9 &= (1 - \xi)(1 + \xi) = I^2 \text{ kod greda} \\
 I^3 + I^4 + I^5 &= \frac{\xi}{2} (1 + \xi) = I^3 \text{ kod greda} \\
 K_{\xi}^1 + K_{\xi}^2 + K_{\xi}^3 &= -\frac{1}{4} \xi (1 - \xi)(1 + \xi) = N_1 N_2 N_3 \\
 w &= I^1 w_1 + I^2 w_2 + I^3 w_3 - \frac{a}{3} N_1 N_2 N_3 (\theta_1 - 2\theta_2 + \theta_3)
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

t.j. interpolacija za pomak svodi se na vezanu interpolaciju za pomak u slučaju grede s tri čvora. Na Slici 9 dan je grafički prikaz oblika funkcija K_j^i odakle se može vidjeti kako se ovim doprinosima podiže stupanj polinoma u vezanoj interpolaciji u odnosu na Lagrangeove polinome.

Zbrajanjem funkcija $K_\xi = K_{1\xi} + K_{2\xi} + K_{3\xi}$ i $K_\eta = K_{1\eta} + K_{2\eta} + K_{3\eta}$ dobivamo funkcije prikazane na Slici 10, koje predstavljaju odgovarajuće obogaćenje prisutno u vezanoj interpolaciji tročvornih grednih elemenata.

5. Primjeri elementa izgrađenih na vezanoj interpolaciji

5.1. Četveročvorni konačni element Auricchio-Taylor (Q4-LIM)

U svojem radu [6], F. Auricchio i R.L. Taylor opisali su četveročvorni pločasti element razvijen po mješovitoj shemi za konačne elemente, vrlo prikladan za opisivanje ploča po Mindlinovoj teoriji, a koji istovremeno konvergira točnom rješenju tankih ploča (Kirchhoffova teorija ploča).

Polazište za razvoj elementa je nezavisno interpoliranje funkcija progiba i zaokreta u obliku:

$$\mathbf{w} = \mathbf{N}^w \mathbf{w}_i + \mathbf{N}^{w\theta} \boldsymbol{\theta}_i \quad \boldsymbol{\theta} = \mathbf{N}^\theta \boldsymbol{\theta}_i + \mathbf{N}^b \boldsymbol{\theta}_b, \quad (32)$$

te istovremeno interpoliranje funkcije sile smicanja po elementu:

$$\mathbf{S} = \mathbf{N}^S \mathbf{S}_b, \quad (33)$$

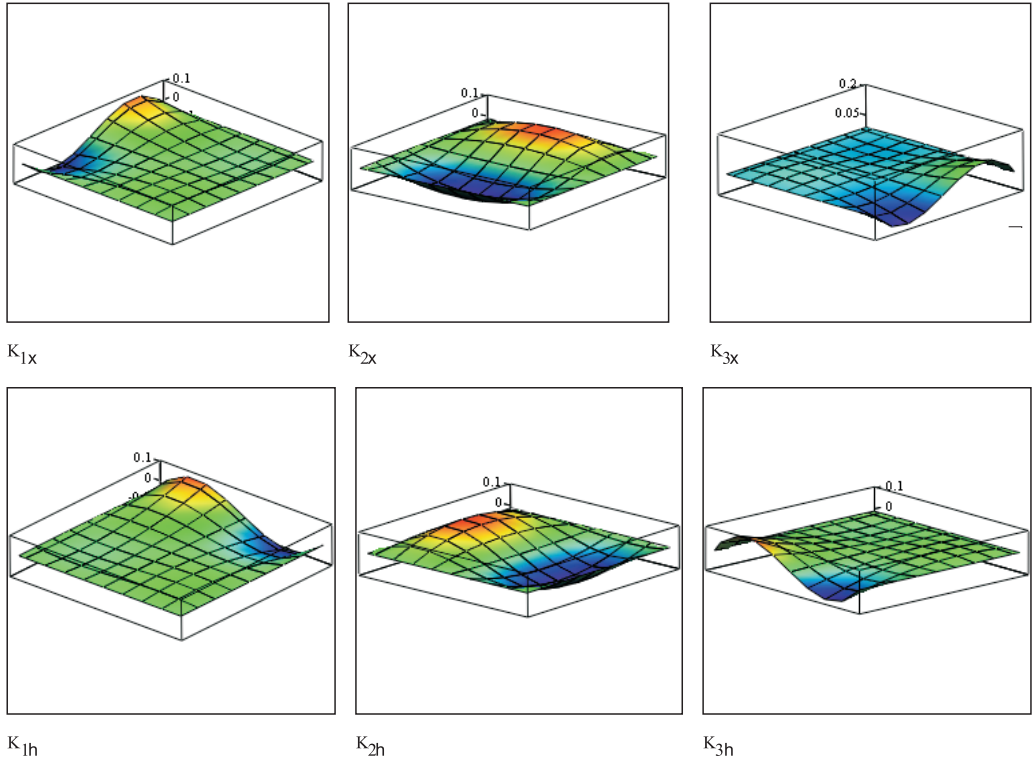
zbog čega je za definiranje matrice krutosti elementa bio nužan mješoviti pristup.

U ovim izrazima funkcija progiba po elementu je opisana preko četiri čvorna pomaka (transverzalne deformacije) w_i ($i = 1, 4$) i osam čvornih zaokreta θ_i ($\theta_{ix}, \theta_{iy}, i = 1, 4$), pri čemu funkcije \mathbf{N}^w su bilinearne funkcije oblika ("shape functions"), a $\mathbf{N}^{w\theta}$ su vezane kvadratne funkcije opisane komponentama čvornih rotacija projiciranih okomito na stranicu elementa (L_j) na koju se odnose:

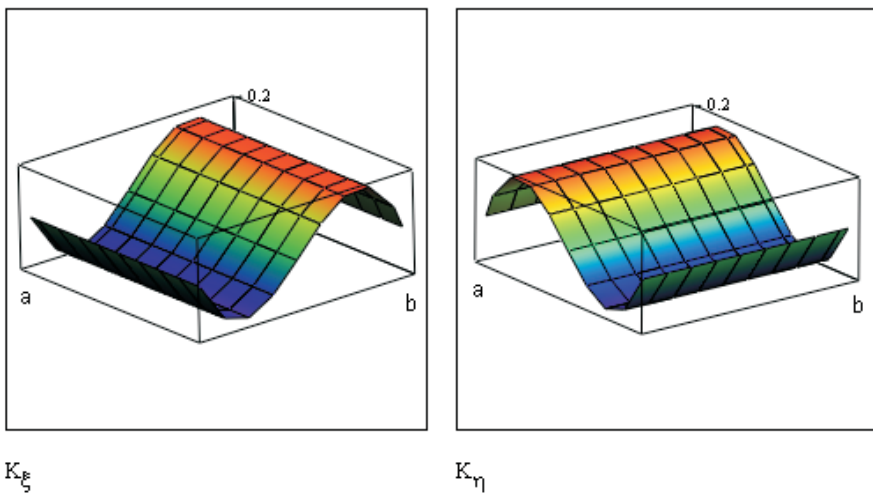
$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^4 N_i^w \mathbf{w}_i - \sum_{i=1}^4 N_i^{w\theta} L_i (\boldsymbol{\theta}_j^n - \boldsymbol{\theta}_i^n) \quad (34)$$

i

$$\begin{aligned} N_1^w &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) & N_1^{w\theta} &= \frac{1}{16}(1-\xi^2)(1-\eta) \\ N_2^w &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) & N_2^{w\theta} &= \frac{1}{16}(1+\xi)(1-\eta^2) \\ N_3^w &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta) & N_3^{w\theta} &= \frac{1}{16}(1-\xi^2)(1+\eta) \\ N_4^w &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) & N_4^{w\theta} &= \frac{1}{16}(1-\xi)(1-\eta^2) \end{aligned} \quad (35)$$



Slika 9. Funkcije K_j^i koje čine osnovnu razliku između Lagrangeove i vezane interpolacije.



Slika 10. Grafički prikaz funkcija K_{ξ} i K_{η} .

Očito je da je ova interpolacija identična vezanoj interpolaciji iz 4.1.

Za razliku od 4.1, međutim, rotacijska polja sada su opisana izrazima u kojima su θ_i parametri čvornih rotacija ($\theta_{ix}, \theta_{iy}, i=1,4$), a θ_b su interni rotacijski stupnjevi slobode ($\theta_b, b=1,4$)

$$\boldsymbol{\theta} = \sum_{i=1}^4 N^{i0} \boldsymbol{\theta}_{x,yi} + \sum_{i=1}^4 N^{bi} \boldsymbol{\theta}_{bi}, \quad (36)$$

pri čemu su N^{i0} ponovo iste bilinearne funkcije oblika kao i N^w , a N^{bi} su “bubble” (“mjehurić”) funkcije oblika:

$$\begin{aligned} N_1^0 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) \\ N_2^0 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) \\ N_3^0 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta) \\ N_4^0 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) \end{aligned} \quad (37)$$

i

$$N^{bi} = \begin{bmatrix} F_{22}^0 & -F_{12}^0 & F_{22}^0 \eta & -F_{12}^0 \xi \\ -F_{21}^0 & F_{11}^0 & -F_{21}^0 \eta & F_{11}^0 \xi \end{bmatrix} \frac{M_b}{\det J} \begin{bmatrix} \theta^{b1} \\ \theta^{b2} \\ \theta^{b3} \\ \theta^{b4} \end{bmatrix} \quad (38)$$

gdje je $M_b = (1 - \xi^2)(1 - \eta^2)$, a F_{ij}^0 su elementi jakobijane izoparametarskog preslikavanja u prirodne koordinate, izračunate za $\xi = \eta = 0$:

$$J^0 = \begin{bmatrix} F_{11}^0 & F_{12}^0 \\ F_{21}^0 & F_{22}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \eta} \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \Big|_{\xi=\eta=0} = \begin{bmatrix} \frac{-x_1 + x_2 + x_3 - x_4}{4} & \frac{-x_1 - x_2 + x_3 + x_4}{4} \\ \frac{-y_1 + y_2 + y_3 - y_4}{4} & \frac{-y_1 - y_2 + y_3 + y_4}{4} \end{bmatrix} \quad (39)$$

a x_p, y_i ($i = 1,4$) su koordinate čvornih točaka elementa u globalnom koordinatnom sustavu dok je $\det J = \left(\frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \xi} \right)$ determinanta jakobijane u integracijskoj točki. Unutarnji rotacijski stupnjevi slobode (“bubbles”) omogućavaju obogaćenje

interpolacijskih polinoma za opis rotacija, ujedno održavajući konformnost interpolirane veličine na rubovima elementa, a pritom ne ulazeći u globalnu matricu krutosti (što doprinosi efikasnosti računskog postupka).

U mješovitom pristupu uvedene su dodatne interpolacijske funkcije za sile smicanja unutar elementa ($S = N^S \mathbf{S}_b$), kojima je izvršeno dodatno „obogaćenje“ parametara elementa za četiri nove veličine (S_b , $b=1,4$), a interpolacijske funkcije N^S su odabrane na sljedeći kompatibilan način u odnosu na “bubble” funkcije:

$$N^{Si} = \begin{bmatrix} F_{11}^0 & F_{21}^0 & F_{11}^0 \eta & F_{21}^0 \zeta \\ F_{12}^0 & F_{22}^0 & F_{12}^0 \eta & F_{22}^0 \zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S^{b1} \\ S^{b2} \\ S^{b3} \\ S^{b4} \end{bmatrix}. \quad (40)$$

Iz ovih se interpolacijskih funkcija primjenom Hellinger-Reissnerovog potencijala (detalji su opisani u [5]) može formirati algebarski sistem jednačbi:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \mathbf{K}_{Sw}^T \\ 0 & \mathbf{K}_{\theta\theta} & \mathbf{K}_{b\theta}^T & \mathbf{K}_{S\theta}^T \\ 0 & \mathbf{K}_{b\theta} & \mathbf{K}_{bb} & \mathbf{K}_{bS} \\ \mathbf{K}_{Sw} & \mathbf{K}_{S\theta} & \mathbf{K}_{bS}^T & \mathbf{K}_{SS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w}^i \\ \boldsymbol{\theta}^{x,yi} \\ \boldsymbol{\theta}^{bi} \\ \mathbf{S}^{bi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}^w \\ \mathbf{f}^\theta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (41)$$

u kojima su nepoznanice pomaci w_i ($i = 1,4$), čvorni zaokreti (θ_{ix} , θ_{iy} , $i=1,4$), unutarnji rotacijski stupnjevi slobode (θ_b , $b = 1,4$) – “bubbles” i unutarnje sile smicanja (S_b , $b = 1,4$), tj. ukupno 20 parametara po jednom elementu. Veličine K u matrici krutosti su integrali deformacijskih energija izračunati preko cijelog elementa za interpolacijske funkcije (integrirani preko 9 Gaussovih točaka) za čije izraze upućujemo na rad [6]. Kako su parametri θ^b i S^b lokalni (svojeviti samo elementu samome), može se provesti kondenzacija sustava jednačbi i to je učinjeno prvo po unutarnjim rotacijskim stupnjevima slobode, a potom po parametrima smicanja. Na taj način je dobivena sljedeća matrica krutosti izražena samo svojim čvornim stupnjevima slobode (4+8 parametara):

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{K}_{Sw}^T \mathbf{A}_{SS}^{-1} \mathbf{K}_{Sw} & -\mathbf{K}_{Sw}^T \mathbf{A}_S^{-1} \mathbf{A}_{S\theta} \\ -\mathbf{A}_{S\theta}^T \mathbf{A}_{SS}^{-1} \mathbf{K}_{Sw} & \mathbf{A}_{\theta\theta} - \mathbf{A}_{S\theta}^T \mathbf{A}_{SS}^{-1} \mathbf{A}_{S\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w}^i \\ \boldsymbol{\theta}^{x,yi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}^w \\ \mathbf{f}^\theta \end{bmatrix}, \quad (42)$$

gdje su $\mathbf{A}_{SS} = \mathbf{K}_{SS} - \mathbf{K}_{bS}^T (\mathbf{K}_{bb})^{-1} \mathbf{K}_{bS}$, $\mathbf{A}_{\theta\theta} = \mathbf{K}_{\theta\theta} - \mathbf{K}_{b\theta}^T (\mathbf{K}_{bb})^{-1} \mathbf{K}_{b\theta}$, $\mathbf{A}_{S\theta} = \mathbf{K}_{S\theta} - \mathbf{K}_{bS}^T (\mathbf{K}_{bb})^{-1} \mathbf{K}_{b\theta}$. Nakon formiranja globalne matrice krutosti i vektora vanjskih sila te nanošenja rubnih uvjeta i rješavanja odgovarajućeg sistema linearnih jednačbi, moguće je

dobiti i unutarnje stupnjeve slobode te odgovarajuće deformacije i naprezanja u integracijskim točkama.

5.2. Četveročvorni reducirani element (Q4-U01)

Temeljem ovako predloženog konačnog elementa izvedenog po mješovitom modelu, razradili smo novi element koji je formiran iz elementa Q4-LIM isključenjem dodatne interpolacije za unutarnje smicanje, pa je to postao “čisti” element opisan vezanom interpolacijom polja pomaka i polja zaokreta:

$$\mathbf{w} = N^w \mathbf{w}_i + N^{w\theta} \boldsymbol{\theta}_i \quad \text{i} \quad \boldsymbol{\theta} = N^\theta \boldsymbol{\theta}_i + N^b \boldsymbol{\theta}_b \quad (43)$$

s uključenim unutarnjim rotacijama. Interpolacijske funkcije su jednake kao i u slučaju elementa Q4-LIM:

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^4 N_i^w \mathbf{w}_i - \sum_{i=1}^4 N_i^{w\theta} L_i (\boldsymbol{\theta}_j^n - \boldsymbol{\theta}_i^n) \quad \text{i} \quad \boldsymbol{\theta} = \sum_{i=1}^4 N_{x,yi}^\theta \boldsymbol{\theta}_{x,yi} + \sum_{i=1}^4 N^{bi} \boldsymbol{\theta}_{bi}, \quad (44)$$

te je time određena matrica krutosti elementa u algebarskim jednadžbama [15]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}S_{ww} & \mathbf{K}S_{\theta ww}^T & \mathbf{K}_{bw}^T \\ \mathbf{K}S_{\theta ww} & \mathbf{K}_{\theta\theta} + \mathbf{K}S_{\theta w \theta w} & \mathbf{K}_{b\theta}^T + \mathbf{K}S_{b\theta w}^T \\ \mathbf{K}S_{bw} & \mathbf{K}_{b\theta} + \mathbf{K}S_{b\theta w} & \mathbf{K}_{bb} + \mathbf{K}S_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w}^i \\ \boldsymbol{\theta}^{x,yi} \\ \boldsymbol{\theta}^{bi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}^w \\ \mathbf{f}^\theta \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (45)$$

Broj nepoznatih parametara je 4 za pomake, 8 za čvorne zaokrete i još 4 za unutarnje zaokrete, tj. ukupno 16 nezavisnih stupnjeva slobode.

U ovim izrazima K_{ij} su elementi matrice krutosti, koji potječu od energije savijanja, a Ks_{ij} su elementi koji potječu od energije smicanja na modelu elementa i računaju se iz integrala:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{\theta\theta} &= \int_A (\mathbf{L}N_\theta)^T \mathbf{D}_b (\mathbf{L}N_\theta) dA \\ \mathbf{K}_{bb} &= \int_A (\mathbf{L}N_b)^T \mathbf{D}_b (\mathbf{L}N_b) dA \\ \mathbf{K}_{b\theta} &= \int_A (\mathbf{L}N_b)^T \mathbf{D}_b (\mathbf{L}N_\theta) dA \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{K}s_{ww} &= \int_A (\nabla N_w)^T \mathbf{D}_s (\nabla N_w) dA \\
\mathbf{K}s_b &= \int_A (\mathbf{e}N_b)^T \mathbf{D}_s (\mathbf{e}N_b) dA \\
\mathbf{K}s_{\theta w \theta w} &= \int_A (\mathbf{e}N_\theta + \nabla N_{w\theta})^T \mathbf{D}_s (\mathbf{e}N_\theta + \nabla N_{w\theta}) dA \\
\mathbf{K}s_{\theta w} &= \int_A (\mathbf{e}N_\theta + \nabla N_{w\theta})^T \mathbf{D}_s (\nabla N_w) dA \\
\mathbf{K}s_{bw} &= \int_A (\mathbf{e}N_b)^T \mathbf{D}_s (\nabla N_w) dA \\
\mathbf{K}s_{b\theta w} &= \int_A (\mathbf{e}N_b)^T \mathbf{D}_s (\mathbf{e}N_\theta + \nabla N_{w\theta}) dA
\end{aligned} \tag{47}$$

gdje su L , ∇ i \mathbf{e} operatori koji igraju ulogu operatora D_1 i D_2 iz poglavlja 2.2, ali u nešto drugačijem zapisu

$$L = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ -\frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \\ -\frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad \nabla = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \tag{48}$$

a D_b i D_s su materijalne matrice za savijanje i smicanje iz istog poglavlja (2.2). Veličine f_w i f_0 na desnoj strani ravnotežne jednadžbe predstavljaju doprinose vanjskoga opterećenja čvornim silama i momentima.

Unutarnji stupnjevi slobode θ^{bi} se i ovdje mogu kondenzirati. Kondenzirana matrica krutosti elementa imat će 12 stupnjeva slobode i glasi:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}s_{ww} - \mathbf{K}s_{bw}^T \mathbf{A}_{bb}^{-1} \mathbf{K}s_{bw} & \mathbf{K}s_{\theta w w}^T - \mathbf{K}s_{bw}^T \mathbf{A}_b^{-1} (\mathbf{K}_{b\theta} + \mathbf{K}s_{b\theta w}) \\ \mathbf{K}s_{\theta w w} - (\mathbf{K}_{b\theta}^T + \mathbf{K}s_{b\theta w}^T) \mathbf{A}_{bb}^{-1} \mathbf{K}s_{bw} & \mathbf{K}_{\theta\theta} + \mathbf{K}s_{\theta w \theta w} - (\mathbf{K}_{b\theta}^T + \mathbf{K}s_{b\theta w}^T) \mathbf{A}_{bb}^{-1} (\mathbf{K}_{b\theta} + \mathbf{K}s_{b\theta w}) \end{bmatrix} \tag{49}$$

gdje je \mathbf{A}_{bb}^{-1} inverzna matrica od $\mathbf{A}_{bb} = \mathbf{K}_{bb} + \mathbf{K}s_{bb}$, simetrične matrice sastavljene od deformacijske energije savijanja i deformacijske energije smicanja.

5.2.1. Četveročvorni dvaput reducirani element (Q4-U02)

Iz gore opisanog modela daljnjom redukcijom izveden je još jednostavniji konačni element opisan istim interpolacijskim funkcijama, ali bez “bubble” unutarnjih stupnjeva rotacijske slobode, pa je polje pomaka ostalo jednako, polje rotacija reducirano na:

$$\mathbf{w} = \mathbf{N}^w \mathbf{w}_i + \mathbf{N}^{\theta} \boldsymbol{\theta}_i \quad \text{i} \quad \boldsymbol{\theta} = \mathbf{N}^{\theta} \boldsymbol{\theta}_i \quad (\text{bez unutarnjih rotacija } \theta^{bi}). \quad (50)$$

Matrica krutosti elementa u algebarskim jednadžbama reducirana je na:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Ks}_{ww} & \mathbf{Ks}_{\theta ww}^T \\ \mathbf{Ks}_{\theta ww} & \mathbf{K}_{\theta\theta} + \mathbf{Ks}_{\theta w \theta w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w}^i \\ \boldsymbol{\theta}^{x,y,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}^w \\ \mathbf{f}^{\theta} \end{bmatrix}, \quad (51)$$

gdje su K_{ij} isti elementi matrice krutosti kao i za element *Q4-U01*. Ova matrica ima direktnih 12 stupnjeva slobode i ne zahtjeva kondenzaciju, a ovaj element u potpunosti je ekvivalentan elementu opisanom u poglavlju 4.1 [11].

6. Numerički primjeri

6.1. Primjer savijanja prosto oslonjene trake

U ovom primjeru istražuje se sposobnost elementa pri statičkoj analizi da uključi ili izuzme energiju smicanja u proračunu. Razmatra se prosto oslonjena traka s odnosom raspona i debljine $L/h = 1$. Iako izvan područja upotrebljivosti po teoriji ploča (za umjereno debele ploče), ovaj omjer L/h omogućava usporedbu numeričkih i točnih rješenja. Materijalne veličine u proračunu su:

$$E = 1000.0, \quad \nu = 0.0 \quad (52)$$

Traka je opterećena na sredini raspona koncentriranom silom $F = 400$ po jedinici širine trake. Iz toga, vertikalni pomaci uslijed savijanja (b) i smicanja (s) su dati izrazima:

$$w_b(\frac{1}{2}L) = FL^3/(48D) = 0.10, \quad w_s(\frac{1}{2}L) = 3FL/(10Gh) = 0.24, \quad (53)$$

gdje je $D = Eh^3/(12(1-\nu^2))$, L je raspon trake, a $G = E/(2(1+\nu))$ modul smicanja, pa je ukupni pomak

$$w_{\text{tot}} = w_b + w_s = 0.10 + 0.24 = 0.34. \quad (54)$$

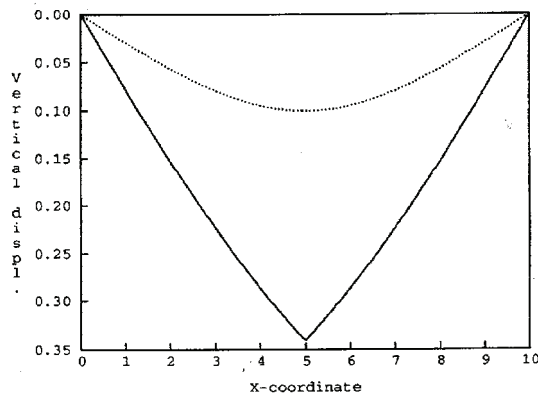
U Tablici 1. dat je pregled numeričkih odgovora za elemente *Q4-LIM*, *Q4-U01* i *Q4-U02* u obliku izračunatih vertikalnih pomaka, momenata i sila smicanja za slučaj sa i bez energije smicanja, izračunatih na sredini raspona trake. Na Slici 11. iscrtani su grafovi vertikalnih pomaka trake za oba slučaja [6]. Može se primijetiti da rezultati svih elemenata konvergiraju točnim rješenjima i prema teoriji deformacijskog smicanja i prema teoriji krutog smicanja, sukladno uračunatoj ili neuračunatoj energiji smicanja. Kod elementa *Q4-LIM*, međutim, ta konvergencija je najbrža.

Tablica 1. Prosto oslonjena greda sa silom na sredini raspona

Mreža	Q4-LIM			Q4-U01, Q4-U02		
	w_b	w_s	w_{tot}	w_b	w_s	w_{tot}
1x10	0.099829	0.24000	0.33983	0.099000	0.24000	0.33900
1x20	0.099958	0.24000	0.33996	0.099750	0.24000	0.33975
1x50	0.099994	0.24000	0.33999	0.099960	0.24000	0.33996
1x100	0.099999	0.24000	0.34000	0.099990	0.24000	0.33999
Točno rješenje	0.100000	0.24000	0.34000	0.100000	0.24000	0.34000

Mreža	Q4-LIM		Q4-U01		Q4-U02	
	M	S	M	S	M	S
1x10	90.0	200.0	90.0	200.0	90.0	200.0
1x20	95.0	200.0	95.0	200.0	95.0	200.0
1x50	98.0	200.0	98.0	200.0	98.0	200.0
1x100	99.0	200.0	99.0	200.0	99.0	200.0
Točno rješenje	100.0	200.0	100.0	200.0	100.0	200.0

Napomena: Sve izračunate vrijednosti momenata i sila smicanja su točne vrijednosti za točke u kojima su računate – težišta elementa najbližeg sredini raspona grede



Slika 11. Prosto oslonjena traka. Vertikalni pomaci trake s energijom smicanja (puni graf) i bez energije smicanja (točkasti graf) [6]

6.2. Primjer prosto oslonjene kvadratne ploče

Drugi primjer koji je odabran za usporedbu ponašanja elemenata je kvadratna ploča slobodno oslonjena na svim rubovima. U modelu je zbog dvoosne simetrije opisana samo jedna četvrtina polja i mreže koje su uspostavljene odnose se na tu četvrtinu. Razmatrana su dva odnosa raspona ploče prema debljini, $L/h = 10$ i $L/h = 1000$, sa jednoliko podijeljenim opterećenjem ($q = 1$) po ploči kao teretom, te materijalnim vrijednostima $E = 1092.0$ i $\nu = 0.3$.

Numerički rezultati za prosto oslonjenu kvadratnu ploču prikazani su za sva tri obrađena elementa u Tablicama 2. i 3. zajedno s Navierovim rješenjem (razvojem u redove). Rubni uvjet slobodnog oslonca je modeliran kao tip SS-2 [4] na svim elementima.

U tablicama su s w^* i M^* označeni progib i moment na sredini raspona ploče ($M_x=M_y=M$):

$$w^* = w / (qL^4/100D)$$

$$M^* = M / (qL^2/100)$$

gdje je $D = Eh^3/(12(1-\nu^2))$, a L je raspon ploče ($L_x=L_y=L$).

U svim slučajevima uočljivo je da element Q4-LIM najbrže konvergira točnim rješenjima za pomake, ali u slučaju debelih ploča ne i za unutarnje sile. Također, važno je napomenuti da mješoviti pristup primijenjen na tome elementu u potpunosti eliminira problem shear-lockinga u slučaju tankih ploča te da primjena vezane interpolacije, za razliku od grednih nosača, ovdje sama po sebi ne uspijeva ukloniti tu anomaliju.

Tablica 2. Prosto oslonjena kvadratna ploča opterećene podijeljenim opterećenjem, $L/h = 10$

Mreža	Q4-LIM		Q4-U01		Q4-U02	
	w^*	M^*	w^*	M^*	w^*	M^*
2x2	0.42626	4.125	0.41218	4.146	0.41163	4.140
4x4	0.42720	4.623	0.42512	4.643	0.42448	4.636
8x8	0.42727	4.747	0.42681	4.753	0.42664	4.751
16x16	0.42728	4.778	0.42717	4.780	0.42713	4.779
Navier red	0.42728	4.7886	0.42728	4.7886	0.42728	4.7886

Napomena: Sve izračunate vrijednosti momenata su vrijednosti u točkama težišta elementa najbližeg sredini raspona grede, a rješenje po Navierovom redu se odnosi na točku sredine ploče.

Tablica 3. Prosto oslonjena kvadratna ploča opterećene podijeljenim opterećenjem, $L/h = 1000$

Mreža	Q4-LIM		Q4-U01		Q4-U02	
	w	M	w	M	w	M
2x2	0.40365	4.119	0.0031093	0.03396	0.0031093	0.03396
4x4	0.40586	4.623	0.055621	0.6654	0.055621	0.6654
8x8	0.40616	4.747	0.29659	3.524	0.29658	3.524
16x16	0.40622	4.778	0.39710	4.677	0.39706	4.677
Navier red	0.40624	4.7886	0.40624	4.7886	0.40624	4.7886

Napomena: Sve izračunate vrijednosti momenata su vrijednosti u točkama težišta elementa najbližeg sredini raspona grede, a rješenje po Navierovom redu se odnosi na točku sredine ploče.

7. Zaključak

U ovome radu izložena je problematika vezana uz odabir interpolacijskih funkcija kod konačnih pločastih elemenata. Prikazana je nova interpolacija, nazvana vezana interpolacija, prema engl. *linked interpolation*. Bit ove interpolacije jest u tome da se pomak interpolira funkcijom koja je za jedan stupanj viša od stupnja funkcije kojom se interpolira kut zaokreta.

Iskustvo na izvedenim primjerima pokazuje je Auricchio –Taylorov element *Q4-LIM* iz rada [6] pokazuje izvrsno ponašanje i već kod rijetkih mreža elemenata daje vrlo bliske vrijednosti deformacija i sila točnim rješenjima i to neovisno od toga da li se promatra deformacija samo od savijanja ili ukupna deformacija (savijanje i smicanje = Mindlinova teorija ploča). Također, element nije znatnije osjetljiv niti na debljinu same ploče u odnosu na raspon.

Elementi *Q4-U01* i *Q4-U02*, koji predstavljaju jednostavnije verzije elementa *Q4-LIM*, znatno su sporiji u približavanju točnim rješenjima. I dok se kod jednodimenzionalnih problema dovoljno brzo približavaju točnim rješenjima, kod dvodimenzionalnih problema zaostajanje postaje znatnije. Razlike u ponašanju između elemenata *Q4-U01* i *Q4-U02* u jednodimenzionalnim problemima uopće ne postoje – deformacije i presječne sile su jednake, što znači da u jednodimenzionalnim problemima unutarnje slobode rotacija nisu aktivirane. U dvodimenzionalnim problemima razlika među njima postoji, ali je minimalna - u četvrtoj znamenici deformacijskih veličina. Doprinos „bubble“ parametara je tek nešto veći kod debljih ploča nego kod tanjih, pa je upitan njihov doprinos točnosti i brzini aproksimacija.

Elementi *Q4-U01* i *Q4-U02* predstavljaju deformacijski bazirane konačne elemente najnižeg reda i u daljnjem radu metodologija njihova razvoja primijenit će se na razvijanje elemenata koji koriste vezanu interpolaciju višeg reda.

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 sporta Republike Hrvatske.

Literatura

- [1] R.L. Taylor, S. Govindjee. *A quadratic linked plate element with an exact thin plate limit*. Report No. UCB/SEMM-2002/10, University of California at Berkeley, Department of Civil and Environmental Engineering, Berkeley, 2002.
- [2] K.-J. Bathe. *Finite Element Procedures*. Prentice Hall, New Jersey, 1989.
- [3] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005.
- [4] T.J.R. Hughes. *The Finite Element Method. Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. Dover Publications, inc., Mineola, New York, 2000.
- [5] F. Auricchio, R.L. Taylor. *A new family of quadrilateral thick plate finite elements based on linked interpolation*. Report No. UCB/SEMM-93/10, University of California at Berkeley, Department of Civil Engineering, Berkeley, 1993.
- [6] F. Auricchio, R.L. Taylor. A shear deformable plate element with an exact thin limit. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **118**: 393-412, 1994.
- [7] C. Chinosi, F. Lovadina. Numerical analysis of some mixed finite element methods for Reissner-Mindlin plates. *Computational Mechanics*, **16**: 36-44, 1995.
- [8] F. Auricchio, R.L. Taylor. A triangular thick plate finite element with an exact thin limit. *Finite Elements in Analysis and Design*, **19**: 57-68, 1995.
- [9] F. Auricchio, C. Lovadina. Analysis of kinematic linked interpolation methods for Reissner-Mindlin plate problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **190**: 2465-2482, 2001.
- [10] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, J.Z. Zhu. *The Finite Element Method. Its Basis and Fundamentals*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005.
- [11] E. Papa. *Vezana interpolacija u linearnoj analizi debelih ploča metodom konačnih elemenata*. Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka, 2007.
- [12] A. Ibrahimbegović. Quadrilateral finite-elements for analysis of thick and thin plates. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **110**: 195-209, 1993.
- [13] G. Jelenić, E. Papa. Linked interpolation of arbitrary order in static linear analysis of 3D thick beam elements. *To be submitted*, 2009.
- [14] E. Papa, G. Jelenić. Vezana interpolacija u konačnim elementima Timošenkovih prostornih greda. U: N. Ožanić, ur., *XI Zbornik radova Građevinskoga fakulteta Sveučilišta u Rijeci*, 131-148. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2008.
- [15] D. Ribarić. Osobne bilješke, 2009.

Procjena troškova uklanjanja postojeće i izvedbe nove armiranobetonske konstrukcije lansirne rampe za ispitivanje torpeda u Rijeci

Cost Estimation of Removal of Existing and New Reinforced Concrete Rijeka Torpedo Launch Pad Station Construction

Lana Buha, Diana Car-Pušić, Ivan Marović

Sažetak. Izgradnja objekta lansirne rampe Torpedo započela je 1929. godine, te se odvijala u dvije etape; gradnjom istočnog, a potom i zapadnog broda. Gradnja zapadnog broda dovršena je oko 1945. godine čime je objekt zaokružen u cjelinu kakva nam je poznata i danas. Građevina lansirne rampe je bila u funkciji testiranja torpeda sve do 1966. godine, a od tada ostaje neiskorištena i vidno zapuštena. Stav Grada Rijeke, kao i niza zainteresiranih čimbenika, jest da je, s obzirom na zapuštenost i oštećenje objekta, potrebno pristupiti sanaciji i prenamjeni lansirne rampe Torpedo u skladu s prostornom dokumentacijom, u cilju očuvanja industrijske baštine grada Rijeke i adekvatnog iskorištenja gradskog prostora. O koliko važnom i vrijednom spomeniku industrijske baštine je riječ, pokazuje i rješenje Ministarstva kulture Republike Hrvatske, doneseno u lipnju 2008. godine, kojim je utvrđen status kulturnog dobra ove građevine. Sanacija objekta se može izvesti popravkom ili zamjenom oštećenih armiranobetonskih elemenata, dok se kod prenamjene mora voditi računa o postojećim gradskim planovima. U ovom radu daje se procjena troškova uklanjanja postojeće i izgradnje nove armiranobetonske konstrukcije, što se može smatrati "ishodišnim izračunom" koji omogućava procjenu troškova sanacije pojedinih konstruktivnih elemenata.

Ključne riječi: lansirna rampa Torpedo, industrijska baština, sanacija armiranobetonske konstrukcije, procjena troškova

Abstract. Torpedo launch pad station was conducted in two phases. First phase started at 1929 when the eastern part of this facility was build. Western part was finished at 1945 when the whole facility took the shape which we know today. Torpedo launch pad station was used for torpedoes final testing purposes and stayed in use until 1966 since then it stayed unused and evidently uncared for. City of Rijeka's attitude is, as well as all interested parties due to facility devastation and amount of damage, that it is necessary to approach facilities recovery and reuse of Torpedo launch pad station according to spatial documentation in order to preserve industrial heritage of Rijeka and adequate utilization of cities space. Importance and value of this industrial heritage monument is shown by the Ministry of Culture of the Republic of Croatia's resolution brought in June 2008 which concludes its status of cultural good. Recovery can be performed by repairing or substituting damaged reinforced concrete elements while in reuse one has to take into account the existing city plans. This paper shows cost estimation for removal of existing and building new reinforced concrete structure, what can be considered as "starting point" which enables cost estimation recovery of certain constructive elements.

Keywords: Torpedo launch pad station, industrial heritage, reinforced concrete construction preservation, cost estimation

1. Uvod

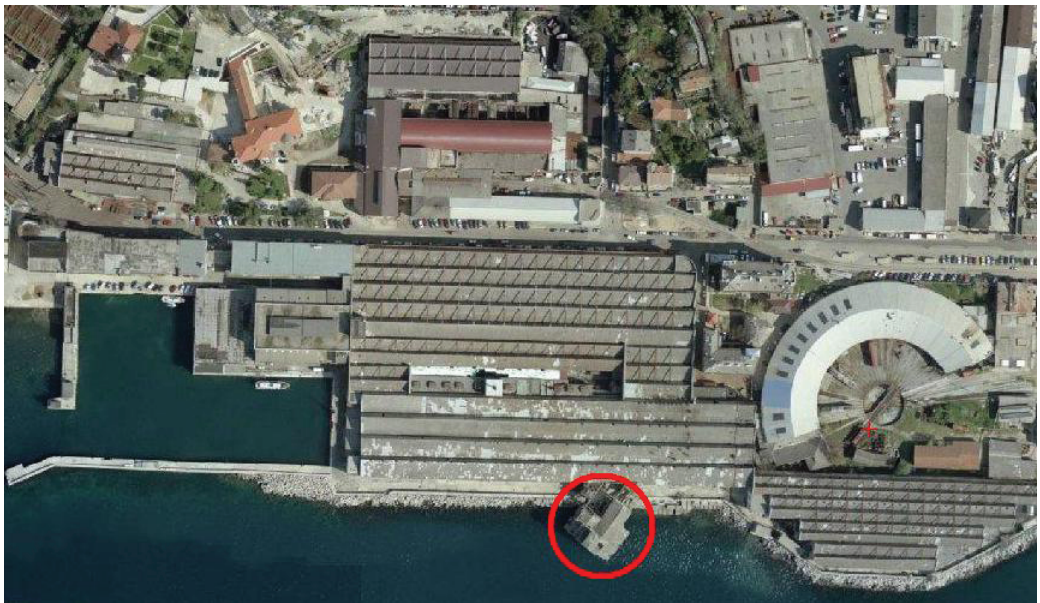
Dobar zemljopisni položaj kao i otkrića proizašla iz Industrijske revolucije direktno su utjecali na industrijalizaciju Rijeke. Naime, to je dovelo do procvata grada u trgovinskom, ekonomskom i graditeljskom pogledu. Time je Rijeka postala jedan od najvažnijih pomorskih središta Jadranskog mora tog vremena.

Ideja o torpedu rođena je i ostvarena u Rijeci. Na ideju o novom, dalekosežnom, samonavodnom, obrambenom oružju došao je kapetan Giovanni Lupis, no nije imao ni tehničkog znanja ni sredstava za razvoj. Prilikom umirovljenja vratio se u rodnu Rijeku gdje je upoznao inženjera Roberta Whiteheada koji je bio na čelu tvornice "Stabilimento Tecnico di Fiume". Na temelju Lupisove ideja Whitehead razvija potpuno novi proizvod i naziva ga torpedo. Tvornica torpeda se razvila iz lijevaonice čelika čiji je, do tada, glavni proizvod bilo lijevanje sidara i popravak parnih brodova. Od sredine 19. do sredine 20. stoljeća u Rijeci su se dizajnirala, izrađivala i testirala torpeda najviše klase. Prema sačuvanim tvorničkim dokumentima u tom je vremenskom periodu izrađeno 20.383 torpeda, 1.053 lansirne cijevi i 1.368 visokotlačnih kompresora [6].

Proizvodnjom torpeda Rijeka je bila afirmirana kao jedan od prepoznatljivih urbanih centara tadašnje Europe, pa čak i svijeta. Sastavni dio tvornice Torpedo bila je lansirna rampa kao jedan od simbola tadašnjeg razvoja i prepoznatljivosti grada. Ovaj objekt je primjer prvorazrednog spomenika primijenjene znanosti i tehnologije.

Naime, prema dostupnim podacima, na ovom mjestu je već oko 1875. godine sagrađena prva lansirna stanica, a potom 1909. godine i druga lansirna stanica koja je nosila naziv “Roberto Whitehead” [7]. Izgradnja lansirne rampe “Giuseppe Orlando”, koju danas poznajemo, započela je 1929. godine, a odvijala se u dvije faze. Tijekom prve faze izgrađen je istočni brod, a zatim je u razdoblju od 1936. do 1945. izgrađen i zapadni brod čime je objekt zaokružen u cjelinu kakva nam je poznata danas [7]. Osim ove dvije lansirne rampe postojala je još jedna rampa koja je nosila ime “Luigi Orlando”. Ta rampa je služila za simulaciju ispaljivanja torpeda iz zrakoplova, dok su prve dvije lansirne rampe služile sa simulaciju ispaljivanja iz čamaca, brodova i podmornica. Danas je sačuvana samo lansirna rampa imena “Giuseppe Orlando”.

Lansirne rampe služile su za testiranje torpeda, između ostalog i provjeri pravocrtnog kretanja torpeda. Testiranja su se provodila sve do 1966. godine, a od tada, pa sve do danas, jedina sačuvana lansirna rampa ostaje neiskorištena i vidljivo zapuštena.



Slika 1. Ortofoto snimak lansirne rampe [5]

Objekt lansirne rampe izgrađen je od armiranog betona, čelika, drva i opeke. Konstrukcija se sastoji od podvodnog dijela i dijela iznad razine mora. Nosivi stupovi konstrukcije, roštiljna konstrukcija radnog poda i okvirna konstrukcija ovog objekta su armiranobetonski elementi. Okvirna betonska konstrukcija je nekad bila oslonac za krovne drvene visulje i nosače staza mosnih dizalica. Okvirna

konstrukcija je jednim svojim dijelom ispunjena šupljom opekom, dok je krovna konstrukcija izvedena od betona i drveta. Na prednjem dijelu konstrukcije nalazi se drvena konstrukcija osmatračnice koja je povišena u odnosu na ostatak krova.



Slika 2. Snimak južnog pročelja lansirne rampe

2. Objekt lansirne rampe Torpedo

2.1. Trenutno stanje konstrukcije

Nakon vizualnog pregleda konstrukcije uočena je korozija armature na svim armiranobetonskim elementima što je rezultiralo odbacivanjem zaštitnog sloja betona. Najizraženija su oštećenja konstrukcije ispod radne platforme gdje je armatura ostala u potpunosti bez zaštitnog sloja i time direktno izložena i nezaštićena, što u krajnosti može dovesti do gubitka mehaničkih veza.

Izloženost podmorskog dijela konstrukcije djelovanju morske soli, mehaničkim udarima valova i erozija podloge temelja obalnog zida uzrokovala je koroziju armature i smanjenje betonskog presjeka stupova i armature, dok je obalni zid u cijeloj svojoj duljini, u nožici zida, podlokani i oštećen. Visina oštećenja je oko 1,0 m, a dubina i do 2,40 m.

Konstrukciju ispod razine mora čine armiranobetonski stupovi i obalni zid na koje se oslanja konstrukcija u razini radnog poda. Prosječna dubina mora uokolo lansirne rampe je 10 metara. Na slici 3 mogu se vidjeti oštećenja pilota kao i oštećenja konstrukcije radne platforme [3].



Slika 3. Detalj pilota i radne platforme odozdo

Radna platforma je roštiljna armiranobetonska konstrukcija koja se sastoji od sustava armiranobetonskih greda na koje je položena armiranobetonska ploča (slika 4). Armiranobetonska podna ploča većim dijelom nedostaje, dok je na armiranobetonskim gredama uočljiv nedostatak zaštitnog sloja betona i jasno se vidi armatura. Ne postoje konstruktivni elementi koji su prihvatljivo malo oštećeni korozijom armature.



Slika 4. Detalj radne platforme odozgo

Iznad razine radnog poda konstrukcija se nastavlja armiranobetonskim okvirima koji su većim dijelom otvoreni, izuzev bočnih strana građevine gdje postoji ispuna od šuplje opeke i drvene stolarije (slika 5).

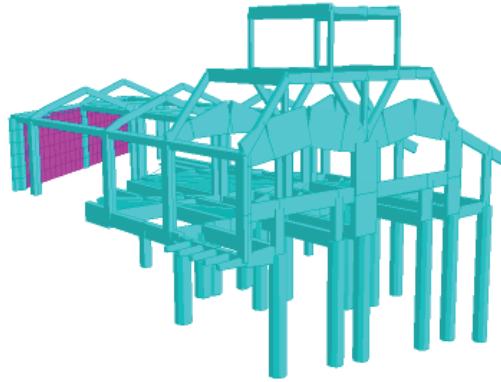


Slika 5. Detalj bočnih zidova lansirne rampe

Na vrhu armiranobetonske konstrukcije nalazi se drvena konstrukcija osmatračnice koja je bila ključni dio objekta za vrijeme procesa testiranja torpeda. Nakon što je torpedo ispaljen uz pomoć lansirne cijevi s osmatračnice se pratilo i bilježilo kretanje torpeda.

2.2. Rezultati elaborata sanacije

Elaboratom sanacije [3] dan je opis postojećeg stanja armiranobetonske konstrukcije koji je ustanovljen nakon vizualnog pregleda konstrukcije, izvještaja o utjecaju klorida, te izvještaju IGH-a. Također je izrađen proračunski model konstrukcije (slika 6) na kojemu se mogu vidjeti poprečni presjeci pojedinih elemenata konstrukcije. Elaboratom su predložene dvije mogućnosti sanacije: popravak postojećih elemenata konstrukcije i/ili njihova zamjena s novim elementima. U skladu s predloženim mogućnostima sanacije, dan je pregled postotnog udjela za potrebu popravka i/ili zamjene po pojedinim grupama elemenata (tablica 1).



Slika 6. Proračunski model konstrukcije [3]

Tablica 1. Pregled postotnog udjela popravka ili zamjene po pojedinim grupama elemenata [3]

AB KONSTRUKCIJA IZNAD RADNOG PODA					
BROD A (zapadni brod)			BROD B (istočni brod)		
Skupina konstrukcijskih elemenata	Popravak (%)	Zamjena (%)	Skupina konstrukcijskih elemenata	Popravak (%)	Zamjena (%)
Stupovi okvira u osi 1-1	50	50	Stupovi okvira u osi 1-1	25	75
Grede okvira u osi 1-1	30	70	Grede okvira u osi 1-1	50	50
Stupovi okvira u osi 2-2	40	60	Stupovi okvira u osi 2-2	0	100
Grede okvira u osi 2-2	100	0	Grede okvira u osi 2-2	100	0
Stupovi okvira u osi 3-3	0	100	Stupovi okvira u osi 3-3	100	0
Grede okvira u osi 3-3	0	100	Grede okvira u osi 3-3	100	0
Stupovi okvira u osi 4-4	50	50	Stupovi okvira u osi 4-4	0	100
Grede okvira u osi 4-4	100	0	Grede okvira u osi 4-4	0	100
Stupovi i grede u osi 5-5	100	0	Stupovi i grede u osi 5-5	100	0
Armiranobetonska konstrukcija u razini radnog poda	80	20	Armiranobetonska konstrukcija u razini radnog poda	80	20
Armiranobetonski stupovi ispod radnog poda	70	30	Armiranobetonski stupovi ispod radnog poda	70	30
Uzdužne grede	100	0	Uzdužne grede	100	0

3. Predračun troškova uklanjanja postojeće i izvedbe nove konstrukcije

3.1. Opis radova i obrazloženje

Aproksimativni troškovnik zasniva se u cijelosti na Elaboratu sanacije [3] koji je utemeljen na prethodno provedenim istražnim radovima (pregled postojeće dokumentacije, vizualni pregled konstrukcije, uvjeti okoliša, terenska ispitivanja i mjerenja, laboratorijska ispitivanja) provedenim prethodno u svrhu izrade elaborata.

U ovom radu daje se procjena troškova uklanjanja postojeće i izrada nove armiranobetonske konstrukcije, što se može smatrati “ishodišnim izračunom” koji omogućava procjenu troškova sanacije pojedinih konstruktivnih elemenata. Upravo kombinacijom aproksimativnog predračuna troškova prikazanih u završnom radu [2] i postotnog udjela popravka ili zamjene po pojedinim grupama elemenata, prikazanih u tablici 1, može se na jednostavan način dobiti iskaz cijena promatranih građevinskih radova na objektu. Pri tumačenju rezultata treba voditi računa o tome da konstrukcija tijekom vremena propada i da joj prijete urušavanje. Postoci dani u tablici 1 su dobiveni na temelju prethodno provedenih istražnih radova izvršenih tijekom prve polovice 2008. godine.

3.2. Struktura predračuna (troškovnika)

Troškovnik je strukturiran kombinirano, prema vrstama radova i prema dijelovima objekta, pri čemu je preuzeta podjela objekta iz Elaborata sanacije: konstrukcija ispod razine radnog poda, konstrukcije u razini radnog poda i konstrukcije iznad radnog poda. Također, konstrukcija je podijeljena na dva broda: brod A (zapadni brod) i brod B (istočni brod).

Unutar troškovnika razlikuju se tri grupe radova: prethodni radovi (u koje je uključeno i uklanjanje postojeće konstrukcije), armirački radovi, te armiranobetonski radovi (betonski radovi u koje je uključena i oplata).

3.3. Primjena tehnoloških rješenja sanacije

Posebnost građevinskih radova čini tehnologija rušenja konstrukcije i izvedbe stupova građevine ispod radne površine. Rušenje konstrukcije izvodi se bagerom gusjeničarom, posebno opremljenim za rušenje specijalnim hidrauličkim alatom za drobljenje betona i sječenje armature. Prethodno je potrebna doprema pontona i sidrenje na poziciji rada. Rušenje stupova ispod morske razine predviđeno je da će se vršiti bagerom opremljenim garniturom za podvodni rad uz dodatno korištenje elektroda za podvodno rezanje armature. Svi radovi podzemnog rušenja izvode se uz ispomoc ronioca. Izrada stupova ispod radne površine izvodi se bušenjem pilota i betoniranjem u čelične cijevi koje služe kao izgubljena oplata.

3.4. Metode obračuna troškova (procjena, obračun)

Predračun troškova rađen je kombinirano, stručnom procjenom na temelju iskustva, te metodom obračunskog faktora na radnu snagu. Troškovi izvedbe bušenih pilota i rušenje kompletne konstrukcije određeni su na temelju inženjerske procjene u konzultaciji sa stručnjacima tvrtke koja ima brojne reference u izvođenju podmorskih radova. Izračun troškova armiračkih i betonskih radova napravljen je metodom obračunskog faktora na radnu snagu. Primjeri izračuna jediničnih cijena za armiračke i betonske radove dani su u tablicama 2 i 3.

3.5. Prikaz proračuna troškova

Dio predračuna troškova koji se odnose na rušenje postojeće konstrukcije i izrada armiranobetonskih pilota izrađen je na temelju stručne procjene, odnosno na temelju iskustva u izvedbi sličnih poslova.

Rušenje postojećih armiranobetonskih stupova ispod razine mora vršit će se bagerom opremljenim garniturom za podvodni rad. Stroj bi se postavio na ponton nosivosti najmanje 500 t koji će se usidriti na radnu poziciju. Radovi će se odvijati uz ispomoc ronioca. Na temelju iskustva u radu na sličnim objektima dana je procjena o potrebnoj mehanizaciji i radnoj snazi:

- Bager – 60 sati rada; $C_p = 60 \cdot 600 = 36.000,00 \text{ kn,}$
- VKR – strojar; $C_p = 24,45 \cdot 60 \cdot 5,00 = 7.335,00 \text{ kn,}$
- Ronilac – 15 sati rada; $C_p = 15 \cdot 150 \cdot 5,00 = 11.250,00 \text{ kn.}$

Iz navedenog proizlazi da ukupna cijena rušenja iznosi: 54.585,00 kn.

Cijena izrade armiranobetonskih stupova građevine ispod radne površine objekta također će se dati na temelju stručne procjene. Izradit će se armiranobetonski bušeni piloti prosječne visine 10 metara. Betoniranje će se vršiti ugradnjom betona C35/45 uz pomoć mobilne pumpe u čelične cijevi koje služe kao izgubljena oplata. Obračun će se vršiti po m^3 ugrađenog betona. U jediničnu cijenu je uključena cijena oplata te potrebne mehanizacije i radne snage za izradu 1 m^3 gotovog pilota. Jedinična cijena za izradu 1 m^3 gotovog pilota je dobivena od izvođača i iznosi 4.000,00 kn/ m^3 . Ukupno treba izraditi 133,41 m^3 pilota. Iz navedenih parametara proizlazi ukupna cijena izvođenja svih pilota koja iznosi 533.640,00 kn.

U nastavku su prikazana dva primjera izračuna analize jedinične cijene metodom obračunskog faktora na radnu snagu. U tablici 2 prikazan je primjer izračuna jedinične cijene armiračkih radova za stupove okvira iznad radnog poda, dok je u tablici 3 prikazan primjer izračuna jedinične cijene betonskih radova za stupove okvira iznad radnog poda. Za analizu cijena korišteni su normativi iz

knjige Normativi i cijene u graditeljstvu [1], dok su pojedinačne cijene dobivene korištenjem Biltena Standardne kalkulacije [8]. Pretpostavljen je faktor na radnu snagu $f = 5,0$.

Tablica 2. Analiza jedinične cijene metodom obračunskog faktora (armirački radovi) [2]

Vrsta radova: Armirački radovi	Broj stavke u troškovniku: I/3
--------------------------------	--------------------------------

Opis stavke: *Dobava, doprema i postavljanje sa vezivanjem obrađene armature, šipke B500B, u stupove okvira iznad radnog poda. U jediničnu cijenu je uključen sav potreban materijal, rad i držači odstojanja. Obračun po kg ugrađene armature.*

Jedinica mjere	kg
----------------	----

A. Materijal sredstva i usluge					
Broj	Normativ	Vrsta materijala	Normirana količina	Jedinična cijena	Ukupno
1.	AR.04.303	Obrađena armatura	1,000	4,03	4,03
2.	AR.04.303	Paljena žica	0,006	3,80	0,02
3.	AR.04.303	Podmetači za odstojanje	0,225	0,73	0,16
A. UKUPNO MATERIJAL					4,22

B. Troškovi rada					
Broj	Normativ	Struka i kvalifikacija	Normirani utrošak	Satnica	Ukupno
1.	AR.04.303	PKR	0,024	20,82	0,50
2.	AR.04.303	KVR	0,024	27,51	0,66
B. UKUPNO RAD					1,16

Obračunski faktor, $f =$	5,0
--------------------------	-----

Cijena = $A + B * f = 4,22 + 1,16 * 5,0 =$	10,02	kn/kg
--	--------------	-------

Tablica 3. Analiza jedinične cijene metodom obračunskog faktora (betonski radovi) [2]

Vrsta radova:	Betonski radovi	Broj stavke u troškovniku:	II/3
---------------	-----------------	----------------------------	------

Opis stavke: *Dobava, doprema i ugradnja betona C35/45 u stupove okvira iznad radnog poda. Beton se doprema automješalicom, $q=9m^3$. Ugradnja se vrši mobilnom pumpom SCHWING 38kW, $U_p=32m^3/h$. Stavkom je obuhvaćena nabava, ugradnja, sav potreban materijal, rad ljudi i strojeva te prijevoz betona od postrojenja do gradilišta. U stavku je uključena i nabava, doprema, postavljanje i skidanje dvostrane oplata za potrebe betoniranja od tvornički izrađenih oplatnih sustava.*

Jedinica mjere	m^3
----------------	-------

A. Materijal sredstva i usluge					
Broj	Normativ	Vrsta materijala	Normirana količina	Jedinična cijena	Ukupno
1.	BE.05.202-4	Beton C35/45	1,000	530,00	530,00
2.	BE.05.202-4	Voda	0,225	7,00	1,58
3.	BE.05.202-4	Vibrator $\Phi 40-50mm$	0,900	66,74	60,07
4.	BE.05.202-4	Mobilna pumpa, $U_p=32m^3/h$	0,031	253,40	7,86
5.	PA-1	Oplatni sustav	4,140	333,92	1382,42
A. UKUPNO MATERIJAL					1981,92

B. Troškovi rada					
Broj	Normativ	Struka i kvalifikacija	Normirani utrošak	Satnica	Ukupno
1.	BE.05.202-4	KVR	2,130	27,51	58,60
B. UKUPNO RAD					58,60

Obračunski faktor, $f =$	5,0
--------------------------	-----

Cijena = $A + B * f = 1981,92 + 58,60 * 5,0 =$	2274,92	kn/ m^3
--	----------------	-----------

3.6. Rekapitulacija troškova

Analiza cijena provedena je korištenjem jediničnih cijena iz Biltena-VI 2008 [8]. Analizom je utvrđeno da prethodni radovi iznose 361.875,41 kn neto, armirački radovi 453.544,58 kn neto, a armiranobetonski radovi 1.170.885,59 kn neto. Iskazane cijene odnose se na izvedbu cijele armiranobetonske konstrukcije.

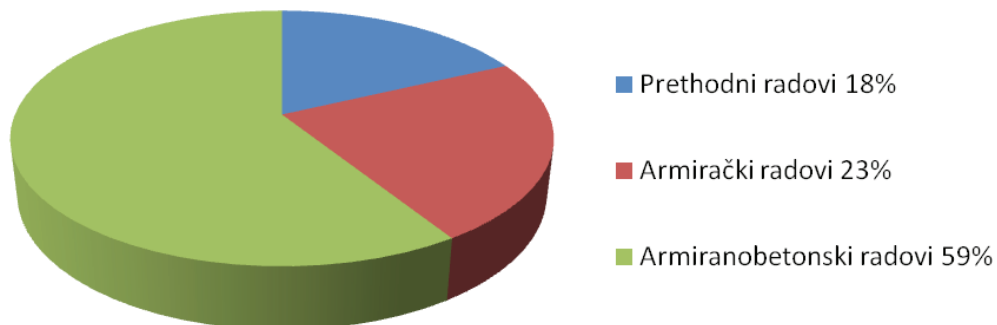
Kao što je vidljivo, najveći udio ukupne cijene otpada na armiranobetonske radove (beton i oplata), čak 59%, a zatim slijede armirački s 23% i prethodni radovi s 18%. Ukupna vrijednost izvedbe ovog projekta iznosi 1.986.305,58 kn neto, tj. 2.443.155,86 kn bruto ili cca. 332.405,00 €. Cijena izvedbe bušenih

pilota dobivena je od izvođača, te nakon što je analizom jedinične cijene utvrđena cijena izvedbe armiranobetonske konstrukcije iznad razine mora, u vrijednosti od 1.090.790,17 kn neto, određena je, radi provjere jedinične cijene, cijena m³ betona koja iznosi 2.300,00 kn, što korespondira s cijenom u praksi.

Bez obzira na činjenicu da je ukupna cijena radova računata na bazi jediničnih cijena iz lipnja 2008. godine ukupna se cijena u sadašnjem trenutku može smatrati realnom s obzirom da su se od tada cijena materijala i rada na tržištu, te vrijednost kune u odnosu na euro mijenjali “skokovito” te se ne može govoriti o ukupnom rastućem ili padajućem trendu. Pri izračunu ukupne cijena rada promatranih građevinskih radova uzeta je u obzir sadašnja stopa PDV-a od 23%.

Tablica 4. Iskaz cijena promatranih građevinskih radova

RBR	RADOVI	NETO CIJENA [kn]	PDV [23%]	BRUTO CIJENA [kn]
1.	Prethodni	361.875,41	83.231,34	444.106,75
2.	Armirački	453.544,58	104.315,25	557.859,83
3.	Armiranobetonski	1.170.885,59	269.303,69	1.440.189,28
UKUPNO:				2.443.155,86



Slika 7. Grafički prikaz strukture ukupne cijene građenja

4. Zaključak

Lansirna rampa Torpedo jest zanimljiva i jedinstvena građevina koja svjedoči o tehničkim i tehnološkim dostignućima vremena u kojem je građena. Unatoč starosti objekta od oko 80 godina, objekt zadnjih 50 godina nije održavan te se nalazi u vrlo lošem stanju. Lansirna rampa je u toj mjeri oštećena i devastirana da joj u skoroj budućnosti može zaprijetiti urušavanje, ukoliko se ne pristupi sanaciji. Na temelju rezultata provedenih pregleda, ispitivanja i proračuna konstrukcije, može se zaključiti da je potrebna hitna sanacija armiranobetonske konstrukcije.

Stav Grada Rijeke, kao i niza zainteresiranih čimbenika, jest da je s obzirom na zapuštenost i oštećenje objekta, potrebno pristupiti sanaciji i prenamjeni lansirne rampe Torpedo u skladu s prostornom dokumentacijom, u cilju očuvanja industrijske baštine grada Rijeke i odgovarajućeg iskorištenja gradskog prostora.

U ovom je radu izrađen predračun troškova sanacije lansirne rampe koji se u osnovi temelji na elaboratu o stanju konstrukcije i mogućnostima sanacije [3]. Predračun je rađen kombiniranom metodom, stručnom procjenom temeljenom na iskustvu izvođača radova, odnosno klasičnom metodom obračunskog faktora. No, kako je intencija zadržavanje, a ne uklanjanje objekta, dobivena se procjena može smatrati "ishodišnim izračunom" koji će poslužiti za proračun djelomične zamjene, odnosno sanacije konstruktivnih elemenata. Upravo kombinacijom aproksimativnog predračuna troškova prikazanih u završnom radu [2] i postotnog udjela popravka ili zamjene po pojedinim grupama elemenata, prikazanih u tablici 1, može se na jednostavan način dobiti iskaz cijena promatranih građevinskih radova na našem objektu. Pri tome, uračunati su i svi troškovi pripremnih radova potrebnih za sanaciju.

Pri tumačenju rezultata treba voditi računa o tome da konstrukcija tijekom vremena propada te da joj prijeti urušavanje. Također, svakim danom i svakim daljnjim zanemarivanjem ovog objekta količina novca potrebnog za sanaciju raste.

Literatura

- [1] G. Bučar. *Normativi i cijene u graditeljstvu*, ICG Omišalj, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2003.
- [2] 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.
- [3] D. Grandić, D. Kovačević, P. Šćulac, P. Topić i dr. Elaborat o stanju konstrukcije lansirne rampe "Torpedo" u Rijeci i mogućnostima sanacije, Rijeka, 2008.

- [4] I. Marović, I. Završki, D. Car-Pušić. *Battle with time – Rijeka's Torpedo Launch Pad Station Rehabilitation*, In: Proc. of 12th International Scientific Conference, Brno, 2009.
- [5] Istraživanje građevinske inženjerske baštine grada Rijeke i okolice, http://www.gradri.hr/bastina/images/torpedo_ortofoto..jpg, 07.05.2008.
- [6] Istraživanje građevinske inženjerske baštine grada Rijeke i okolice, <http://www.gradri.hr/bastina/torpedo.html>, 18.11.2008.
- [7] Silurficio Whitehead di Fiume S. A. – Sede in Fiume, *La Storia del Siluro 1860-1936*, Stabilimento Tipografico Alessandro Pesce, Genova, 1936.
- [8] Standardna kalkulacija radova u visokogradnji - Bilten VI-2008, IGH, Zagreb, 2008.

Deformacijske značajke nevezanih zrnatih materijala

Deformation properties of unbound granular materials

Marijana Cuculić*, Željko Arbanas**,
Aleksandra Deluka-Tibljaš*

Sažetak. Projektiranje kolničkih konstrukcija predstavlja proces koji podrazumijeva odabir optimalne kombinacije različitih debljina slojeva i vrsta materijala uzimajući u obzir uvjete temeljnog tla, prometnog opterećenja i okoline. Tradicionalne metode projektiranja, uobičajene u svakodnevnoj projektantskoj praksi, u pravilu su empirijske. Za potrebe boljeg razumijevanja ponašanja i deformacijskih značajki materijala koji se ugrađuju u kolničke konstrukcije razvijene su analitičke metode projektiranja, koje podrazumijevaju primjenu eksperimentalnih pristupa i prikladnu matematičku karakterizaciju ponašanja pri cikličkom opterećenju konstrukcija. Cilj ovoga rada je dati pregled dosadašnjih istraživanja vezanih za utvrđivanje elastičnih i plastičnih deformacijskih značajki nevezanog zrnatog materijala koji se koristi u strukturi kolničkih konstrukcija. Pokazati će se utjecaj parametara koji utječu na deformacijske značajke nevezanih zrnatih materijala. Prikazati će se modeli kojima se opisuje elastično i plastično ponašanje nevezanih zrnatih materijala pri djelovanju opterećenja karakterističnih za kolničke konstrukcije.

Ključne riječi: nevezani zrnati materijal, deformacije, kolnička konstrukcija

* Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, V.C. Emina 5, 51000 Rijeka, E-mail: marijana.cuculic@gradri.hr, deluka@gradri.hr

** Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, V.C. Emina 5, 51000 Rijeka; Institut IGH d.d., Sektor IGH Projekt, Zavod za geotehničke konstrukcije, PC Rijeka, S. Tomašića 5, 51000 Rijeka, E-mail: zeljko.arbanas@igh.hr

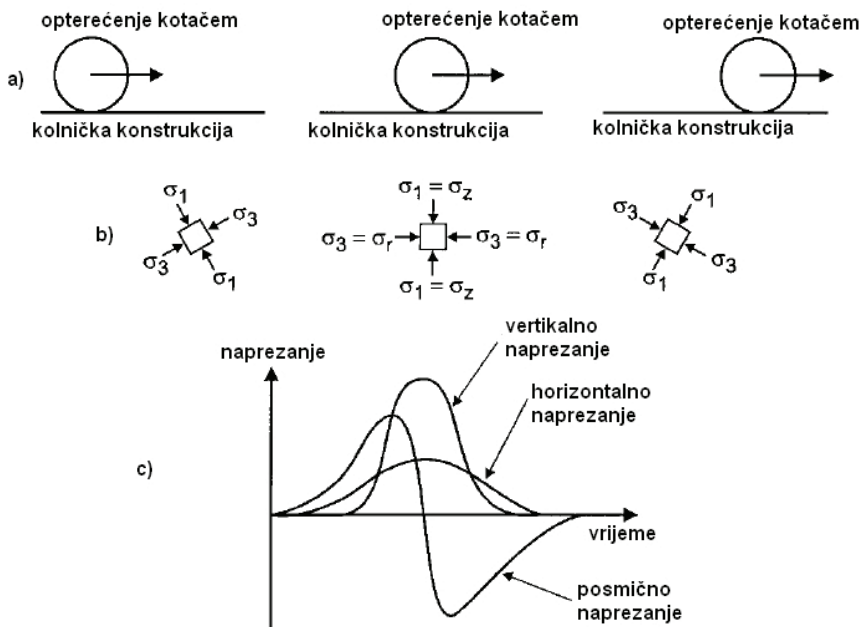
Abstract. Pavement design is a process intended to find the most economical combination of layer thickness and material type for the pavement, taking into account the properties of the soil foundation, the traffic to be carried and the environmental conditions. Traditional design methods, usual in daily design practice, are more or less empirical. For a better understanding of behaviour and deformation properties of the material built in pavement construction, analytical methods of design are developed, which imply experimental approach application and appropriate mathematical characterization of behaviour under cyclic loading.

The goal of this paper is to present elastic and plastic deformation properties of unbound granular material used in pavement structures. The paper describes factors affecting deformation properties of unbound granular material. This paper will present models which describe elastic and plastic behaviour of unbound granular material under characteristic loads for pavement structures.

Key words: unbound granular material, deformations, pavement construction

1. Uvod

Tijekom vijeka trajanja kolnička konstrukcija izložena je velikom broju ponavljano opterećenja koje utječe na promjene veličina vertikalnih, horizontalnih i posmičnih naprezanja. Promjena položaja opterećenja uvjetuje promjenu veličine naprezanja uslijed promjene položaja osi glavnih naprezanja (Slika 1) [1].



Slika 1. Naprezanja uslijed promijene položaja opterećenja; a) Položaj opterećenja; b) Položaj osi glavnih naprezanja; c) Stanje naprezanja u kolničkoj konstrukciji [1]

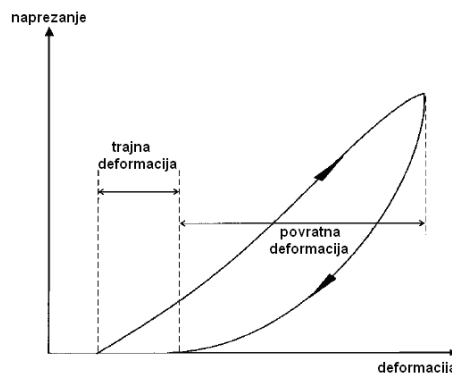
Deformacija zrnatih materijala izloženih ponavljanom opterećenju sastoji se od dvije komponente: elastične deformacije i plastične deformacije. Iako je plastična deformacija tijekom jednog ciklusa opterećenja samo dio ukupne deformacije, postupno nakupljanje velikog broja malih inkrementa plastične deformacije može dovesti do sloma kolničke konstrukcije [1].

2. Mehanizmi ponašanja nevezanih zrnatih materijala

U daljnjem tekstu opisuje se ponašanje zrnatih nevezanih materijala u području elastičnosti i plastičnosti.

2.1. *Elastično ponašanje*

Ponašanje zrnatih nevezanih materijala opisuje se elastičnim modelima. Termin *elastičnost* podrazumijeva da se energija koja se javlja u materijalu prilikom opterećenja, oslobađa rasterećenjem [2].



Slika 2. Deformacije u zrnatom materijalu tijekom jednog ciklusa opterećenja [2]

Slika 2 prikazuje deformacije u zrnatom materijalu tijekom jednog ciklusa opterećenja. Prava priroda mehanizma deformacija materijala u zrnatim slojevima još uvijek nije u potpunosti istražena. Prihvaćeno je da je deformacija materijala izloženog opterećenju rezultat tri glavna mehanizma – konsolidacije, distorzije i trošenja. Ako se govori o nevezanim zrnatim materijalima, glavni faktori koji utječu na strukturalni odgovor savitljivih kolnika su ponašanje zrnatog materijala pri opterećenju, elastični odaziv i nakupljanje trajnih deformacija [2].

Teorija elastičnosti tradicionalno definira elastične osobine tla putem Youngovog modula elastičnosti, E , i Poissonovog koeficijenta, ν , koji su konstante materijala. Kada se govori o nevezanim materijalima u konstrukciji kolnika,

modul elastičnosti, E , zamjenjuje se s modulom stišljivosti, M_R . U triaksijalnom ispitivanju ponavljano opterećenja pri ograničenom naprezanju, modul stišljivosti definira se kao omjer vršnog osnog devijatora ponavljano naprezanja i vršne povratne osne deformacije uzorka (1) [2].

$$M_R = \frac{\sigma_d^{din}}{\varepsilon_a^e} \quad (1)$$

gdje su:

M_R – modul stišljivosti,

σ_d^{din} – primijenjeno dinamičko devijatorsko naprezanje i

ε_a^e – osna povratna deformacija.

Razvijen je veliki broj modela koji opisuju nelinearno elastično ponašanje nevezanih zrnatih materijala. U nastavku su opisana dva najstarija i najkorištenija modela [2].

2.1.1. Model $k - \theta$

Model $k - \theta$ je nelinearan model ponašanja ovisan o naprezanju u materijalu [3]. Vrijednost modula stišljivosti slijedi iz sume glavnih naprezanja ili volumenskih naprezanja (2a i 2b):

$$M_R = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (2a)$$

$$M_R = k_1 \cdot \left(\frac{\theta}{p_0} \right)^{k_2} \quad (2b)$$

gdje su:

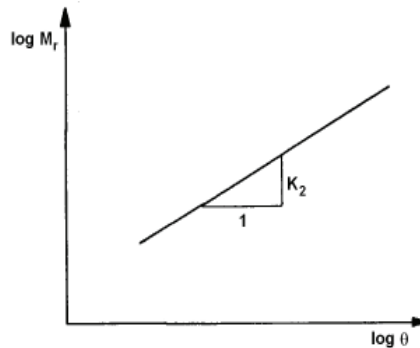
$\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$ – volumensko naprezanje,

k_1, k_2 – parametri modela iz regresijske analize rezultata triaksijalnih ispitivanja i

p_0 – referentno naprezanje (atmosferski pritisak = 100 kPa).

Zbog jednostavnosti, model $k - \theta$ često se koristi za definiranje korelacija između naprezanja i čvrstoće materijala. Model predviđa konstantnu vrijednost Poissonovog koeficijenta, koji se koristi za izračun radijalne deformacije. Međutim, brojna ispitivanja su pokazala da Poissonov koeficijent nije konstanta i mijenja se s primijenjenim naprezanjem [4].

Iz istraživanja pri konstantnom Poissonovom koeficijentu, Sweere [5] dolazi do zaključka da model $k - \theta$ daje dobra predviđanja za aksijalnu deformaciju, ali loše rezultate za radijalnu i volumensku deformaciju. Drugi nedostatak je činjenica da model izračunava modul stišljivosti iz utjecaja naprezanja isključivo iz sume glavnih naprezanja. Veći broj istraživanja ukazao je na potrebu za uključivanjem više parametara u model [4].



Slika 3. Standardan prikaz odnosa modula stišljivosti M_R i volumenskog naprezanja θ [5]

Prikaz modula stišljivosti i naprezanja u logaritamskom mjerilu, dobiven je linearan odnos (Slika 3) [5].

2.1.2. Uzanov model

Uzan je iz modela $k - \theta$ razvio novi nelinearan model koji uzima u obzir devijatorsko naprezanje [2]:

$$M_R = k_1 \cdot p_0 \cdot \left(\frac{\theta}{p_0} \right)^{k_2} \left(\frac{q}{p_0} \right)^{k_3} \quad (3a)$$

$$M_R = k_1 \cdot p_0 \cdot \left(\frac{\theta}{p_0} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_0} \right)^{k_3} \quad (3b)$$

gdje su:

$\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$ – volumensko naprezanje,

k_1, k_2, k_3 – parametri modela iz regresijske analize rezultata triaksijalnih ispitivanja,

q – devijatorsko naprezanje ($\sigma_1 - \sigma_3$),

p_0 – referentno naprezanje (atmosferski pritisak = 100 kPa) i

τ_{oct} – oktaedarsko naprezanje.

Jednadžba (3a) primjenjuje se u slučaju dvodimenzionalnih problema dok se jednadžba (3b) primjenjuje u trodimenzionalnim problemima. Iz jednadžbe (3b) vidljivo je da je u trodimenzionalnom slučaju devijatorsko naprezanje zamijenjeno oktaedarskim naprežanjem. Uzanov model se u istraživanjima pokazao bolji od modela $k - \theta$, i to zbog mogućnosti razdvajanja utjecaja različitih naprežanja na vrijednosti modula stišljivosti [4].

Elliot i Lourdesnathan [6] ispitivali su primjenjivost modela $k - \theta$ za ponavljano devijatorsko naprežanje ispod i iznad stanja statičkog sloma. Za naprežanje neposredno prije sloma model je pokazao dobre rezultate. Iako je poznato da se pri naprežanjima koja prelaze slom moduli elastičnosti smanjuju s povećanjem promjene volumena, model pokazuje suprotno. Isti su predložili da se model $k - \theta$ modificira uvođenjem novog parametra u jednadžbu sloma koji ima vrlo mali utjecaj sve do pojave sloma [6]:

$$M_R = k_1 \frac{\theta^{k_2}}{10^{A_1}} \quad (4)$$

gdje su:

$\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$ – volumensko naprežanje,

k_1, k_2 – parametri modela iz regresijske analize rezultata triaksijalnih ispitivanja i

$A_1 = m \cdot R^3$ – (R je omjer naprežanja i čvrstoće).

Kolisoja je povezoao oba modela uzimajući u obzir gustoću materijala preko veličine relativnog poroziteta [7]:

$$M_R = A(n_{\max} - n)p_0 \left(\frac{\theta}{p_0} \right)^{0,5} \quad (5a)$$

$$M_R = B(n_{\max} - n)p_0 \left(\frac{\theta}{p_0} \right)^{0,7} \left(\frac{q}{p_0} \right)^{-0,2} \quad (5b)$$

gdje su:

n – porozitet materijala,

n_{\max} – maksimalni porozitet materijala,

A, B – parametri modela,

$\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$ – volumensko naprežanje,

p_0 – referentno naprežanje (atmosferski pritisak = 100 kPa) i

q – devijatorsko naprežanje ($\sigma_1 - \sigma_3$).

2.2. *Plastično ponašanje*

Trajne, plastične, deformacije predstavljaju nepovratni dio deformacija tijekom rasterećenja. Nakupljaju se pri ponavljanju ciklusa opterećenja i rasterećenja. Navedeno nakupljanje plastičnih deformacija u strukturi uzorka dovodi do preraspodjele čestica u kruću strukturu ili vodi do sloma [2].

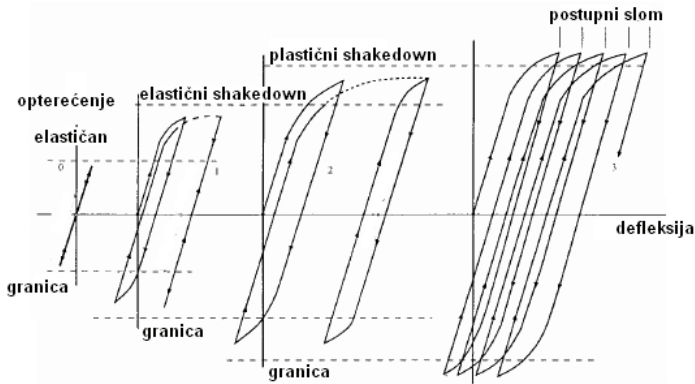
Za uspješno projektiranje kolničke konstrukcije, materijal mora biti otporan na akumulaciju trajne deformacije. Trajne deformacije nevezanog zrnatog materijala dovode do nepovratnih deformacija kolničke površine. Iz navedenog razloga kolnička konstrukcija mora biti projektirana na način da se stalne deformacije u pojedinim slojevima ili uopće ne pojavljuju, ili pojavljuju u neznačajnoj količini. To ukazuje da maksimalna razina opterećenja, koja je povezana samo s elastičnim odazivom, mora biti poznata i ne smije se prekoračiti tijekom korištenja. To također ukazuje na postojanje kritične razine opterećenja između stabilnog i nestabilnog stanja u kolniku [8].

2.2.1. *Shakedown koncept*

Shakedown koncept (*shakedown* eng., trešnja, potresanje, ali i premještanje čestica uslijed potresanja) koristi se za opisivanje plastičnog ponašanja nevezanog zrnatog materijala izloženog cikličkom opterećenju [9].

Koncept obuhvaća četiri kategorije odaziva materijala izloženog ponavljanom cikličkom opterećenju (Slika 4) [10]:

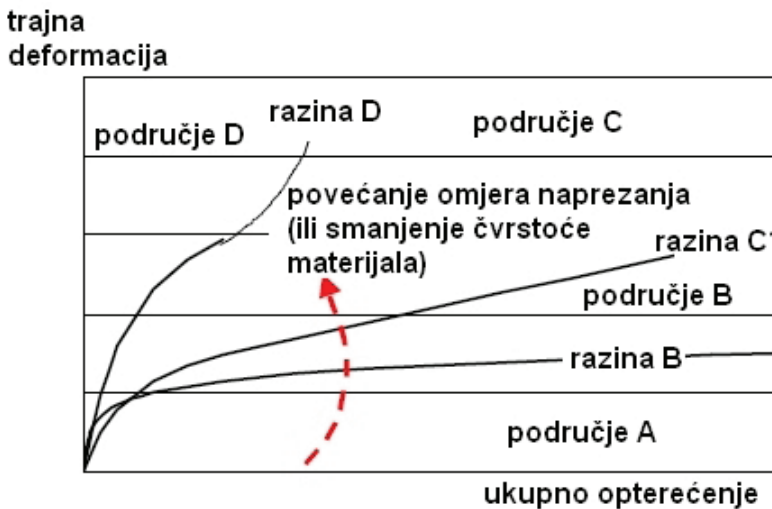
- a) *Potpuno elastičan odaziv*, primijenjeno ponavljano naprezanje je dovoljno malo tako da ni jedan element materijala ne prelazi u stanje popuštanja. Od prve primjene opterećenja sve deformacije su povratne, pa je i odaziv potpuno elastičan.
- b) *Elastičan shakedown odaziv*, primijenjeno ponavljano naprezanje nešto je manje od potrebnog za izazivanje plastičnog *shakedown* odaziva. Odaziv materijala je plastičan za konačan broj nanošenja opterećenja. Maksimalna razina naprezanja pri kojem je navedeno stanje postignuto definirano je kao elastična *shakedown* razina.
- c) *Plastični shakedown odaziv*, primijenjeno ponavljano naprezanje je nešto manje od potrebnog za izazivanje postupnog sloma. Maksimalna razina naprezanja pri kojem je navedeno stanje postignuto definirana je kao plastična *shakedown* razina.
- d) *Postupni slom*, primijenjeno ponavljano naprezanje je relativno veliko. Značajna zona materijala je u stanju popuštanja i plastične deformacije se nakupljaju ubrzano pri čemu se slom pojavljuje u relativno kratkom periodu.



Slika 4. Kategorije shakedown ponašanja pod ponavljanim cikličkim opterećenjem [10]

Dawson i dr. [11] predstavili su metodu prikaza rezultata trajne deformacije u ovisnosti o kumulativnom opterećenju (Slika 5). Prilikom ispitivanja ni jedan rezultat nije pokazao pripadnost području A s potpuno elastičnim ponašanjem. Ovaj tip odaziva materijala ne pojavljuje se u realnim nevezanim zrnatima materijalima ugrađenim u kolničku konstrukciju.

Werkmeister i dr. [10] proučavali su ponašanje nevezanih zrnatih materijala koristeći opisani pristup. Rezultati ispitivanja ukazuju na ponašanje materijala u područjima B, C i D (Slika 5).

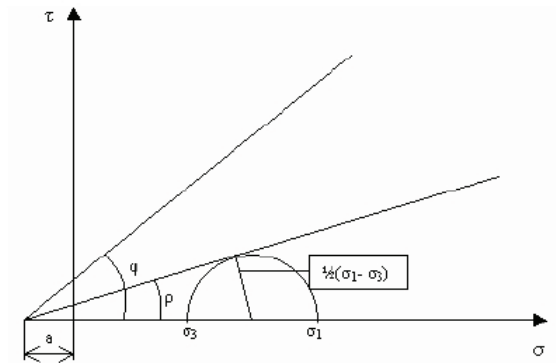


Slika 5. Razina shakedown ponašanja za trajne deformacije u odnosu na kumulativno opterećenje [10]

2.2.2. Mohr – Coulombov pristup

Mohr – Coulombov pristup proizlazi iz rezultata triaksijalnog ispitivanja nevezanog zrnatog materijala izloženog cikličkom opterećenju. Treba uzeti u obzir da će anvelope stanja naprezanja pri slomu iz rezultata pri cikličkom dinamičkom opterećenju biti različite od onih dobivenih pri statičkom opterećenju [2].

Slika 6 prikazuje Mohr – Coulombov kriterij čvrstoće na τ - σ dijagramu [2].



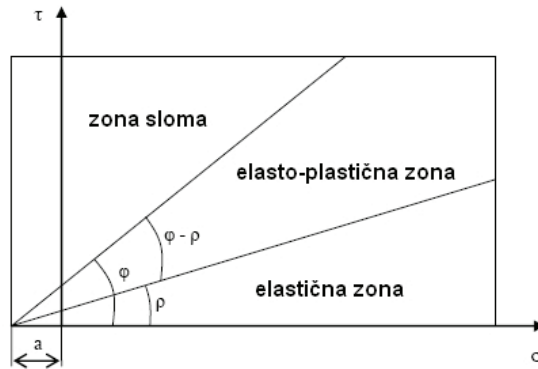
Slika 6. Stupanj mobilizirane čvrstoće izražen mobiliziranim kutem trenja i pravac čvrstoće određen kutom sloma [2]

Trajne deformacije ovisne su o stupnju mobilizirane čvrstoće. Stupanj mobilizirane čvrstoće predstavlja odnos mobiliziranog otpora i čvrstoće materijala prema izrazu [2]:

$$\sin \rho = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2a} \quad (6)$$

gdje su:

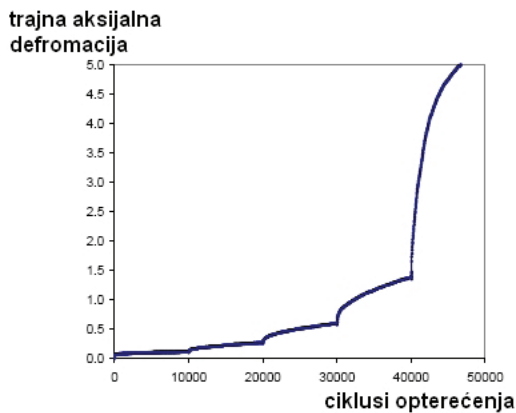
- ρ – mobilizirani kut trenja,
- σ_1 – veće glavno naprezanje,
- σ_3 – manje glavno naprezanje i
- a – adhezija.



Slika 7. Razine ponašanja materijala izloženog cikličkom opterećenju [2]

Na slici 7 prikazane su različite razine ponašanja materijala dobivene triaksijalnim ispitivanjem materijala podvrgnutom cikličkom opterećenju. Međutim, postoji potreba za kriterijem koji će odrediti granice između različitih razina ponašanja materijala: elastično, elastično – plastično, plastično (slom) [2].

Stupanj deformacije ϵ je mjerilo prirasta trajne deformacije. Pojam se koristi za razvoj trajne deformacije po ciklusu. Slika 8 prikazuje nakupljanje trajne osne deformacije u funkciji broja ciklusa opterećenja [2].



Slika 8. Nakupljanje aksijalne trajne deformacije kao funkcija broja ponavljano opterećenja [2]

Dok se kod statičkog triaksijalnog ispitivanja granica sloma može odrediti u fazi popuštanja, kod cikličkog triaksijalnog ispitivanja mjerodavan faktor je stupanj deformacije [2].

3. Utjecajni parametri

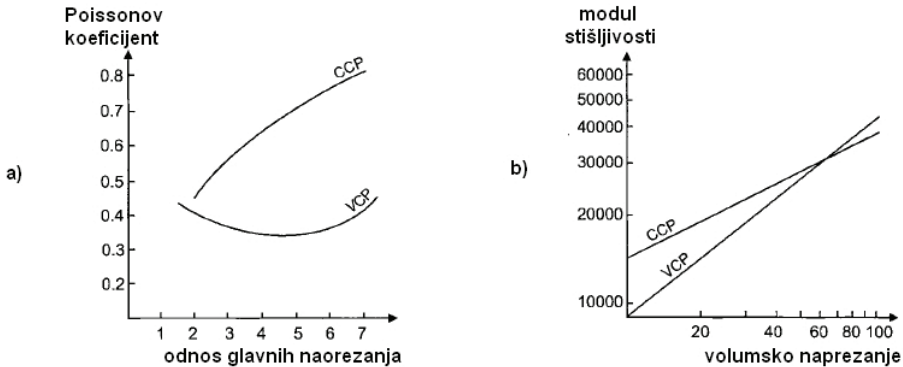
U daljnjem tekstu daje se pregled glavnih parametara koji utječu na ponašanje nevezanih zrnatih materijala.

3.1. Vrsta materijala i oblik zrna

Geometrijski oblik zrna važan je za ponašanje nevezanog zrnatog materijala. Hicks i Monismith [12] došli su do zaključka da su moduli elastičnosti drobljenog materijala veći od modula elastičnosti djelomično drobljenog materijala bez obzira na granulometrijski sastav. Allen i Thompson [13] i Barksdale i Itani [14] zaključili su da moduli elastičnosti imaju veće vrijednosti kod drobljenih materijala nego kod prirodnog šljunka. Barksdale i Itani [14] također su zaključili da je šljunak više podložan kolotražanju od drobljenog materijala. Janoo [15] iz laboratorijskih ispitivanja dolazi do zaključka da materijal zaobljenih zrna pri cikličkom opterećenju poprima značajno veće trajne deformacije nego materijal s uglastim zrnima. To se objašnjava proklizavanjem oblikih zrna dok uglasta zrna moraju savladati veće sile trenja na kontaktnim površinama. Iz navedenog ispitivanja zaključeno je da se kut unutarnjeg trenja, a s njime i otpornost prema trajnim deformacijama povećava s povećanjem uglatosti zrna [2].

3.2. Stanje naprezanja

Prethodna ispitivanja, od ranih ispitivanja Williamsa do novijih istraživanja Kolisoje, pokazuju bez iznimke da je razina primijenjenog naprezanja jedan od glavnih faktora koji utječu na elastična svojstva nevezanih zrnatih materijala [7]. Brojna istraživanja [5, 16, 17, 18] ukazuju visoki stupanj utjecaja stanja naprezanja i sume glavnih naprezanja na module elastičnosti nevezanih zrnatih materijala. Moduli elastičnosti i stišljivosti znatno se povećavaju s porastom primijenjenih naprezanja i sume glavnih naprezanja [13, 16].



Slika 9. Rezultati triaksijalnog ispitivanja CCP i VCP [13];

a) Promjena Poissonovog koeficijenta u zavisnosti o odnosu glavnih napreznja;

b) Promjena modula stišljivosti u zavisnosti o volumenskom napreznju

Slika 9 prikazuje tipične rezultate triaksijalnih ispitivanja Allena i Thompsona [13]. Allen i Thompson usporedili su rezultate dobivene iz triaksijalnog pokusa sa stalnim primijenjenim napreznjima (CCP) i triaksijalnog pokusa s promjenjivim primijenjenim napreznjima (VCP) s ograničenim bočnim deformacijama. Rezultati ispitivanja su pokazali da se više vrijednosti modula elastičnosti dobivaju ispitivanjima sa stalnim napreznjima (CCP) (Slika 9) [13]. Rezultati također ukazuju da ispitivanja sa stalnim napreznjima (CCP) rezultiraju većim poprečnim deformacijama i višim vrijednostima Poissonovog koeficijenta [13].

3.3. Gustoća, granulometrijski sastav i sadržaj sitnih čestica

Povećanje gustoće zrnatog materijala znatno mijenja njegov odziv na statičko opterećenje. Više istraživanja [7,17,19,20,21] je pokazalo da se moduli elastičnosti najčešće povećavaju s povećanjem gustoće materijala.

Trollope i dr. [19] dobivaju rezultate ispitivanja ponavljano opterećenja na homogenom pijesku te zaključuju povećanje do 50 % u modulima elastičnosti između rastresitih i zbijenih uzoraka.

Broj kontaktnih površina po čestici znatno se povećava s povećanjem gustoće te rezultira dodatnim zbijanjem čestica. Istovremeno se smanjuje prosječno kontaktno napreznje. Stoga se deformacije na kontaktnim površinama smanjuju, a moduli elastičnosti rastu [7].

S druge strane, Thom i Brown [22] i Brown i Selig [23] tvrde da je utjecaj gustoće, odnosno stanje zbijenosti relativno nevažno.

Hicks i Monismith [12] dolaze do zaključka da utjecaj gustoće ima veće značenje kod djelomično drobljenih materijala nego kod potpuno drobljenih materijala.

Rezultati istraživanja ukazuju da se moduli elastičnosti povećavaju s porastom relativne gustoće kod djelomično drobljenih materijala dok kod potpuno drobljenih materijala vrijednosti ostaju gotovo nepromijenjene.

Barksdale i Itani [14] iz istraživanja zaključuju da se moduli elastičnosti znatno povećavaju s povećanjem gustoće samo pri nižim vrijednostima srednjeg glavnog naprezanja

Brojna istraživanja [22, 24] zaključuju da se moduli elastičnosti smanjuju kada se poveća sadržaj sitnih čestica u materijalu.

Hicks i Monismith [12] uočili su smanjenje u vrijednostima modula elastičnosti s povećanjem sadržaja sitnih čestica za djelomično drobljeni materijal dok je kod potpuno drobljenih materijala rezultat suprotan.

Hicks i Monismith [12] provedenim istraživanjima nisu dobili pouzdane o utjecaju granulometrijskog sastava na elastična svojstva. Vrsta materijala očito utječe na rezultate, ali za drobljeni materijal povećanje u vrijednostima modula elastičnosti uzrokuje povećanje sadržaja sitnih čestica.

Thom i Brown [22] zaključuju da je jednolično graduiran materijal krući od dobro graduiranog materijala za istu maksimalnu veličinu zrna.

3.4. Trajanje i frekvencija opterećenja

U većem broju istraživanja [3, 17, 22, 25, 26] analiziran je utjecaj trajanja i frekvencije opterećenja na module elastičnosti. Iz rezultata istraživanja može se zaključiti da trajanje i frekvencija opterećenja nema ili ima malen utjecaj na elastično ponašanje nevezanog zrnatog materijala.

Seed i dr. [3] objavili su studiju iz koje je uočljivo da se moduli elastičnosti pijeska malo povećavaju sa smanjenjem trajanja opterećenja.

Hicks [17] provodi istraživanja pri različitom kratkom trajanju opterećenja i ne nailazi na promjene u modulima elastičnosti i Poissonovim koeficijentima.

3.5. Vlažnost

Sadržaj vlage većine zrnatih materijala utječe na elastične karakteristike i u laboratorijskim uvjetima i na terenu [19].

Općenito se smatra da je elastični odziv suhog i djelomično zasićenog zrnatog materijala sličan, ali potpuno zasićenje može značajno utjecati na elastična svojstva [27].

Istraživanja [12, 14, 28, 29, 30] u kojima su proučavana ponašanja zrnatih materijala pri visokom stupnju zasićenja, ukazala su na značajnu ovisnost modula

elastičnosti o sadržaju vode i to smanjenje modula elastičnosti s povećanjem stupnja zasićenosti.

Haynes i Yoder [28] su zapazili značajno smanjenje modula elastičnosti kod šljunka s povećanjem stupnja zasićenosti.

U saturiranom zrnatom materijalu razvija se porni tlak pri djelovanju ponavljanih opterećenja. S razvojem pornog tlaka, efektivna naprežanja u materijalu se smanjuju što uzrokuje smanjenje čvrstoće i krutosti materijala [19].

Mitry [31], Seed i dr. [3] i Hicks [17] su utvrdili da smanjenje u modulima elastičnosti uslijed zasićenja proizlazi iz analiza temeljenih na totalnim naprežanjima.

Thom i Brown [22] tvrde da prisutnost vode u materijalu ima učinak “podmazivanja” čestica. To povećava deformacije u materijalu sa stanovitim smanjenjem modula elastičnosti, čak bez razvoja pornog tlaka.

Raad i dr. [32] pokazali su da je utjecaj vlažnosti na module elastičnosti nevezanog zrnatog materijala najznačajniji kod dobro građuiranih materijala s velikim udjelom sitnih čestica, a što je posljedica manje vodopropusnosti takvih materijala.

3.6. Veličina uzorka

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) određuje da je promjer uzorka funkcija veličine maksimalnog zrna materijala korištenog u temeljnom materijalu, a omjer promjera i visine uzorka je 1:2 [33].

Pokusni rad Taylora ukazuje da se pouzdani podaci dobivaju iz uzoraka pravilnih rubova ograničenog odnosa (L/d) 1.5 do 3 [19].

Lee [33] utvrđuje da za ispitivanja uzoraka tla s pravilnim rubovima odnos L/d mora biti ograničen na 2 do 2.5.

U brojnim istraživanjima proučavan je utjecaj veličine uzorka i zaključeno je da se odnos d/L uzorka može smanjiti na 1 ako se koriste komore bez utjecaja trenja. Adu – Osei i dr. [34] mijenjali su odnos L/d uzorka sa 2:1 do 1:1. Zaključili su da uzorci odnosa 1:1 daju bolje rezultate kada se membrane u triaksijalnoj ćeliji podmazuje. Zaključeno je da su takvi uzorci ujedno više pouzdani i praktični [34].

3.7. Povijest opterećenja

Istraživanja su pokazala da povijest opterećenja ima značajan utjecaj na elastično ponašanje zrnatog materijala. Prema Dehleni, utjecaj povijesti opterećenja pojavljuje

se kao posljedica postupnog slijeganja i preraspodjele čestica pod ponavljanim opterećenjem [35].

Boyce i dr. [26] proveli su triaksijalne pokuse sa cikličkim opterećenjem na jednakim uzorcima dobro građiranog drobljenog vapnenca zbijenog na istu gustoću u suhom stanju. Rezultati su pokazali da utjecaj povijesti opterećenja postoji, ali se može smanjiti ponovnim opterećenjem s nekoliko ciklusa pri istoj amplitudi naprezanja [26].

Brown i Hyde [36] i Mayhew [37] zaključili su da su elastična svojstva nevezanog zrnatog materijala neosjetljiva na povijest opterećenja, jer je primijenjeno naprezanje dovoljno malo za sprječavanje značajnih trajnih deformacija u materijalu.

Moore i dr. [38] proučavali su utjecaj broja ponavljanja opterećenja na elastični odaziv zrnatog materijala. Zaključili su da se moduli elastičnosti povećavaju s povećanjem broja ponavljanog opterećenja.

4. Modeli ponašanja

Brojni faktori istodobno utječu i na veličine modula elastičnosti i trajnih deformacija zrnatog nevezanog materijala. Međutim, utjecaj na module elastičnosti nije i ne može biti isti kao na pojavu trajnih deformacija [33].

4.1. Statički model

Statički model za predviđanje trajnih deformacija u donjim slojevima kolničke konstrukcije temelji se na modelu Tsenga i Lyttona [39]:

$$\delta_a(N) = \beta_{GB} \cdot \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) \cdot e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^{\beta}} \cdot \epsilon_v \cdot h \quad (6)$$

gdje su:

δ_a – trajna deformacija sloja,

N – broj prijelaza opterećenja,

β_{GB} – nacionalni faktor kalibracije,

ϵ_0 , β , ρ – parametri karakteristika materijala,

ϵ_r – elastična deformacija dobivena iz laboratorijskih ispitivanja,

h – debljina sloja i

ϵ_v – prosječna vrijednost vertikalne elastične deformacije u sloju dobivena na primarnom modelu.

Nedostatak ovog modela je što ne uzima u obzir karakteristike materijala iz triaksijalnog ispitivanja. Vrijednosti karakteristika materijala dobivaju se kao prosječne vrijednosti uz pomoć statističkih vrijednosti kolotražnja na realnim kolnicima [39].

4.2. Matematički model ponašanja kolničkih konstrukcija pod djelovanjem opterećenja kotača

Model se temelji na dva faktora koji uzrokuju trajne deformacije u nevezanim zrnatim materijalima – broj ponavljanja opterećenja i razina naprezanja [39]:

$$\varepsilon_p = A \cdot N^B \cdot \left(\frac{\sigma_1}{\sigma'} \right)^C \quad \text{za } \varepsilon_p < \varepsilon_0 \quad (7a)$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_0 + (N - N_0) \cdot A^{\frac{1}{B}} \cdot B \cdot \varepsilon_0^{1-\frac{1}{B}} \cdot \left(\frac{\sigma_1}{\sigma'} \right)^{\frac{C}{B}} \quad \text{za } \varepsilon_p > \varepsilon_0 \quad (7b)$$

gdje su:

ε_p – plastična deformacija,

N – broj ponavljanja opterećenja,

σ_1 – veće glavno (vertikalno) naprezanje,

σ' – referentni pritisak (atmosferski pritisak = 100 kPa),

A, B, C – konstante kalibracije i

$$N_0 = \varepsilon_0^{\frac{1}{B}} \cdot A^{-\frac{1}{B}} \cdot \left(\frac{\sigma_1}{\sigma'} \right)^{-\frac{C}{B}} \quad (8)$$

4.3. Dresden (Huurman) model

Dresden model temelji se na opisanom *shakedown* konceptu s postojanjem kritične razine naprezanja do kojeg je materijal stabilan [39]:

$$\varepsilon_p \cdot (N) = A \cdot \left(\frac{N}{1000} \right)^B \cdot C \cdot \left(e^{\frac{D \cdot N}{1000}} - 1 \right) \quad (9)$$

gdje su:

ε_p – plastična deformacija,

N – broj ciklusa opterećenja i

A, B, C, D – parametri modela ovisni o naprezanju.

Model opisuje trajnu deformaciju kao funkciju napreznja i broja ponavljanja opterećenja. Parametri materijala (A , B , C , D) izračunavaju se iz regresijskih analiza iz rezultata triaksijalnih ispitivanja [39].

4.4. Pojednostavljeni Dresden model

Iz Dresden modela razvijen je pojednostavljen model za predviđanje trajnih deformacija u nevezanim materijalima, koji koristi osnu elastičnu deformaciju za predviđanje osne plastične deformacije [39].

Plastična deformacija u kolničkoj konstrukciji može se podijeliti na dva dijela [39]:

- primarnu konsolidaciju nakon izgradnje i
- “mirnu fazu” (eng. steady state).

Mirna faza započinje kada odnos nakupljene plastične deformacije i broja ciklusa opterećenja postane linearan, a elastična deformacija konstantna [39].

Odnos je dobiven koristeći laboratorijske podatke i podatke dobivene iz istraživanja na terenu. Izraz za prirast plastične deformacije glasi [39]:

$$\dot{\epsilon}_p = E \cdot \epsilon_e^F \quad (10)$$

gdje su:

- $\dot{\epsilon}_p$ – prirast srednje plastične deformacije,
- ϵ_e – srednja elastična deformacija i
- E, F – parametri materijala.

Eksponecijalni odnos između srednje elastične deformacije ϵ_e i stupnja plastične deformacije ϵ može se primjenjivati dok je posmično napreznje u donjim slojevima dovoljno malo i dok se ponašanje materijala može opisati potpuno elastičnim ili sa *shakedown* elastičnim odazivom [39].

Broj ponavljanja opterećenja do završetka faze primarne konsolidacije ovisan je o elastičnoj deformaciji [39]:

$$N_{ep} = 211,71 \cdot \epsilon_e^{0,8232} \quad (11)$$

gdje su:

- N_{ep} – broj ponavljanja opterećenja do završetka primarne faze i
- ϵ_e – aksijalna elastična deformacija.

Eksponencijalni odnos između stupnja plastične deformacije tijekom primarne konsolidacije i stupnja plastične deformacije u mirnoj fazi iznosi [39]:

$$R = 0,0042 \cdot \varepsilon_p^{-0,6869} \quad (12)$$

gdje su:

$\dot{\varepsilon}$ – stupanj plastične deformacije tijekom mirne faze,

ε_p – plastična deformacija i

R – koeficijent između stupnja plastične deformacije u primarnoj konsolidaciji i stupnja plastične deformacije u mirnoj fazi.

4.5. LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) model

Prema LCPC modelu naprezanja, mineralogija i vlažnost imaju veliki utjecaj na trajne deformacije, a na ukupnu deformaciju uzorka ne utječe način opterećivanja. Trajna aksijalna deformacija na završetku ispitivanja je gotovo linearna s q (ili p ako je q/p konstanta).

Iz navedenih rezultata izveden je empirijski deformacijski model [39]:

$$\varepsilon_1^p(N) = \varepsilon_1^{p_0} [1 - N]^B \cdot \left(\frac{L_{\max}}{p_0} \right)^n \cdot \frac{1}{m + \frac{s}{p_{\max}} - \frac{q_{\max}}{p_{\max}}} \quad (13)$$

gdje su:

ε_1^p – trajna aksijalna deformacija,

N – broj ciklusa opterećenja,

$\varepsilon_1^{p_0}$, B , n – parametri modela,

p_0 – referentni pritisak (atmosferski pritisak = 100 kPa),

m , s – parametri anvelope sloma materijala (iskustveno $m = 2,5 - 2,6$; $s = 20$ kPa)

i

$$L_{\max} = \sqrt{p_{\max}^2 + q_{\max}^2} \quad (14)$$

5. Zaključak

Materijali koji se koriste u donjim slojevima kolničke konstrukcije moraju zadovoljiti dva osnovna kriterija. Prvi kriterij povezan je s cijenom, budući da cijena materijala mora biti prihvatljiva i materijal mora biti dostupan u velikim

količinama. Drugi kriterij je povezan s mehaničkim odgovorom konstrukcije na naprezanje koje se javlja uslijed prometnog opterećenja. U ovom radu analizirao se drugi kriterij.

Nevezani zrnati materijali izloženi ponavljanom opterećenju pokazuju složeno elastoplastično ponašanje.

Na elastično ponašanje zrnatih materijala utječu brojni faktori, a najznačajniji su primijenjeno naprezanje i vlažnost. Moduli stišljivosti znatno se povećavaju s porastom primijenjenih naprezanja i sumom glavnih naprezanja, a nešto manje s porastom devijatorskih naprezanja. Moduli stišljivosti se znatno smanjuju s povećanjem vlažnosti.

Razvoj plastične deformacije u zrnatim materijalima uzrokuju slijedeći faktori: razina naprezanja, broj ciklusa opterećenja, vlažnost, povijest opterećenja, gustoća, sadržaj sitnih čestica, granulometrijski sastav te vrsta materijala. Trajna deformacija izravno je povezana s veličinom devijatorskih naprezanja, a neizravno s veličinom srednjih naprezanja. Međutim, neka istraživanja predlažu za izračun trajne deformacije uvođenje koeficijenta naprezanja koji uključuje devijatorska i srednja naprezanja. Brojna istraživanja su pokazala da promjena glavnih naprezanja uslijed prometnog opterećenja uvelike povećava količinu plastičnih deformacija u nevezanim materijalima. Porast trajnih deformacija u nevezanim materijalima je postupni proces tijekom kojeg svako novo opterećenje pridonosi malom porastu akumulacije trajnih deformacija. Stoga je broj ciklusa opterećenja prepoznat kao značajan faktor. Na količinu trajnih deformacija u zrnatim nevezanim materijalima veliki utjecaj ima i vlažnost. Pri visokim stupnjevima zasićenosti, deformacijske značajke materijala se brzo smanjuju. Utjecaj povijesti opterećenja prepoznat je kao faktor u brojnim istraživanjima, ali još uvijek je slabo istražen. U laboratorijskim uvjetima, utjecaj povijesti opterećenja je zanemarivan upotrebom novih uzoraka pri svakom novom istraživanju. Sadržaj sitnih čestica ima utjecaj na smanjenje deformacijskih značajki zrnatih materijala. Međutim, sadržaj sitnih čestica potreban je u mješavini zbog ispunjavanja šupljina između većih zrna materijala. Gustoća se opisuje stupnjem zbijenosti. Povećanje gustoće nevezanih materijala utječe na smanjenje trajnih deformacija. Utjecaj granulometrijskog sastava, prema različitim autorima, različito se objašnjava. Utjecaj vrste materijala može se smanjiti upotrebom drobljenog uglastog materijala umjesto zaobljenog materijala/prirodnog šljunka.

Postupci za predviđanje trajnih deformacija u nevezanim zrnatim materijalima većinom se temelje na utjecaju broja ciklusa opterećenja i primijenjenom opterećenju. Postupna akumulacija trajne deformacije definira se kao funkcija broja ponavljanja opterećenja. Udio akumulirane trajne deformacije nakon određenog broja ponavljanja opterećenja, definira se kao funkcija komponenti naprezanja. Pojedini

modeli temelje se na pretpostavci da se akumulacija trajne deformacije smanjuje te da je konačan odgovor konstrukcije potpuno elastičan. Drugi modeli predviđaju kontinuirani prirast trajne deformacije bez znakova stabilizacije u materijalu. Postoje istraživanja koja ukazuju da dugotrajna stabilnost znatih materijala ovisi o razini primijenjenog opterećenja, tako da niska razina naprezanja dovodi do ravnotežnog stanja dok visoka razina naprezanja vodi prema brznoj akumulaciji trajne deformacije i mogućem slomu. Ovaj zaključak korišten je za razvoj modela na osnovi *shakedown* koncepta.

Razvijeni su veći broj modela koji opisuju razvoj deformacija u nevezanim znatim materijalima. Modeli su razvijeni uvažavajući različite koncepte i utjecajne faktore ovisno o postignutim rezultatima istraživanja. Još uvijek ne postoje modeli koji daju zadovoljavajuće procjene trajnih deformacija na osnovi općih karakteristika materijala i usvojenih utjecajnih faktora.

Literatura

- [1] Lekarp F, Resilient and Permanent Deformation Behaviour of Unbound Aggregates under Repeated Loading, TRITA-IP FR 99-57, Kungliga Tekniska Högskolan, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1999
- [2] Uthus L, Deformation Properties of Unbound Granular Aggregates, Thesis for the degree of philosophiae doctor, NTNU, Trondheim, 2007
- [3] Seed HB; Chan CK i Lee CE, Resilience characteristics of subgrade soils and their relations to fatigue in asphalt pavements, Proceedings of International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, USA. Vol 1, pp 611-636, 1962
- [4] Lekarp F; Isacsson U i Dawson A, State of the art. II: Permanent strain response of unbound aggregates, J. Transp. Engrg., ASCE, 126(1), 76-83, 2000
- [5] Sweere GTH, Unbound granular basis for roads, PhD thesis, Univerity of Delft, Delft, The Netherlands, 1990
- [6] Elliot RP i Lourdesnathan D, Improved characterization model for granular bases, Transp. Res. Rec. 1227, TRB, Washington, DC, 27-36, 1989
- [7] Kolisoja P, Resilient Deformation Characteristics of Granular Materials, PhD. dissertation, Tampere University of Technology, Publication No 223, Tampere, Finland, 1997
- [8] Werkmeister S; Numrich R; Dawson AR i Wellner F, Deformation behaviour of granular materials under repeated dynamic load, Symposium on Environmental Geotechnics, Monte Verità, 2002

- [9] Sharp R, Pavement design based on shakedown–analyses, *Transp.Res. Rec.1022*, pp 99–107, 1985
- [10] Werkmeister S; Dawson AR i Wellner F, Permanent deformation behaviour of unbound granular materials and shakedown theory, *Journal of the TRB,1757, Geomaterials*, 2001
- [11] Dawson AR; Thom NH i Paute JL, Mechanical characteristics of unbound granular materials as a function of condition, *Flexible Pavements, Proc., Eur. Symp.Euroflex, A.G. Correia, ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands*, 35–44, 1999
- [12] Hicks RG i Monismith CL, Factors influencing the resilient properties of granular materials, *Hwy. Res. Rec. 345*, 15–31, 1971
- [13] Allen JJ i Thompson MR, Resilient response of granular materials to time dependent lateral stresses, *Transp.Res.Rec.510*, TRB, Washington, 1–13, 1974
- [14] Barksdale R i Itani S, Influence of Aggregate shape on Base Behaviour, *Paper Transp.Res.Rec.1227*, TRB, National Research Council, Washington, pp 173–182, 1989
- [15] Janoo V, Quantification of shape, angularity and surface texture of base course materials, *Special Report 98–1*, US Army Corps ofengineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Hanover NH, USA, 1998
- [16] Monismith CL; Seed HB; Mitry FG i Chan CK, Prediction of Pavement Deflections from laboratory Tests, *Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, Mich, pp 109 -14, 1967
- [17] Hicks RG, Factors influencing the resilient properties of granular materials, *PhD thesis*, University of California, Berkeley, 1970
- [18] Uzan J, Characterization of granular material, *Transp.Res.Rec.1022*, TRB, Washington DC, 52–59, 1985
- [19] Trollope EH; Lee IK i Moris J, Stresses and deformation in two–layer pavement structures under slow repeated loading, *Proc., ARRB, Vol 1, Part 2*, 693–718, 1962
- [20] Robinson RG, Measurement of the elastic properties of granular materials using a resonance method, *TRRL Supplementary Rep. No. 111UC*, TRRL, 1974
- [21] Rada G i Witczak MW, Comprehensive evaluation of laboratory resilient moduli results for granular material, *Transp.Res.Rec.810*, TRB, Washington, 73 – 82, 1981
- [22] Thom NH i Brown SF, The effect of grading and density on the mechanical properties of a crushed dolomitic limestone, *Proc., 14th ARRB Conf., Vol 14, Part 7*, 94–100, 1988

-
- [23] Brown SF i Selig ET, The design of pavement and rail track foundations, Cyclic loading of soils: From theory to design, M.P. O'Reilly i S.F. Brown, eds., Blackie and Son Ltd., Glasgow, Scotland, 249–305, 1991
- [24] Kamal MA; Dawson AR; Farouki OT; Hughes DAB i Sha`at AA, Field and laboratory evaluation of the mechanical behaviour of unbound granular materials in pavements, Transp.Res.Rec.1406, TRB, Washington, 88–97, 1993
- [25] Morgan JR, The response of granular materials to repeated loading, Proc.,3rd Conf., ARRB, 1178–1192, 1966
- [26] Boyce JR; Brown SF i Pell PS, The resilient behaviour of a granular material under repeated loading, Proc., 8th ARRB Conf. Mat. Constr. And Maintance, Vol. 8, Part 3, 1–12, 1976
- [27] Smith WS. i Nair K, Development of procedures for characterization of untreated granular base coarse and asphalt-treated base course materials, Rep.No.FHWA-RD-74-61, FHAW, Washington DC, 1973
- [28] Haynes JG i Yoder EJ, Effects of repeated loading on gravel and crushed stone base course materials used in the AASHO Road Test, Hwy. Res. Rec. 39, 1963
- [29] Dawson AR; Thom NH i Paute JL, Mechanical characteristics of unbound granular materials as a function of condition, Flexible Pavements, Proc.,Eur. Symp.Euroflex 1993, A.G. Correia, ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 35–44, 1996
- [30] Heydinger AG; Xie QL; Randolph BW i Gupta JD, Analysis of resilient modulus of dense and open-graded aggregates,Transp.Res.Rec.1547, TRB, Washington, 1–6, 1996
- [31] Mitry FG, Determination of the modulus of resilient deformation of untreated base course materials, PhD thesis, University of California, Berkeley, 1964
- [32] Raad L; Minassian G i Gartin S, Characterization of saturated granular bases under repeated loads, Transp.Res.Rec.1369, TRB, Washington, 73–82, 1992
- [33] Kancherla A, Resilient modulus and permanent deformation testing of unbound granular materials, Thesis for the degree of master of science, A & M University, Texas, 2004
- [34] Adu-Osei A, Characterization of unbound granular materials, Ph.D. dissertation, Department of civil engineering, Texas A&M University, College Station, Texas, 2000
- [35] Dehlen DL, The effect of non-linear material response on the behaviour of pavements subjected to traffic loads, PhD thesis, University of California, Berkeley, 1969

-
- [36] Brown SF i Hyde AFL, Significance of cyclic confining stress in repeated-load triaxial testing of granular material, *Transp.Res.Rec.537*, TRB, Washington, 49–58, 1975
 - [37] Mayhew HC, Resilient properties of unbound road base under repeated triaxial loading, *Lab. Rep. 1088*, TRRL, Crowthorne, U.K., 1983
 - [38] Moore WM; Britton SC i Schrivner FH, A laboratory study of the relation of stress to strain for a crushed limestone base material, *Res.Rep.99-5F*, Study 2-8-65-99, Texas Transp. Inst., Texas A&M University, College Station, Texas, 1970
 - [39] Huvstig A; Erlingsson S; Hoff I i Saba RG, NordFoU–Pavement Performance Models. Part 2: Project Level, Unbound Material, *Advances in Transportation Geotechnics; Proceedings of the 1st International conference on transportation geotechnics*, Nottingham, UK, 2008

Aerodinamika visokog čeličnog stupa nosača rasvjete prema europskoj normi

Aerodynamics of high steel mast bearing illumination according to the European standard

Paulina Katavić, Mladen Bulić, Mehmed Čaušević

Sažetak. U praksi je primijećeno da projektanti visokih čeličnih stupova (jarbola) nosača antena i rasvjete imaju nedovoljno iskustva glede izračuna djelovanja sila vjetra na takve konstrukcije prema EN. Za takve konstrukcije treba primijeniti dinamički proračun za što je potrebno poznavanje elemenata aerodinamike.

U ovom radu je prikazana analiza visokog čeličnog stupa nosača rasvjete nogometnog igrališta. Proračun ovakve konstrukcije je zahtjevan sa stanovišta poznavanja elemenata aerodinamike za određivanje sila vjetra na konstrukciju. U radu se na primjeru jedne stvarne konstrukcije pokazuje kako se određuje djelovanje vjetra, te kako se konstrukcija dimenzionira prema krajnjem graničnom stanju i prema graničnom stanju uporabivosti. Proračun djelovanja vjetra provodi se posebno za čelični stup te posebno za reflektore. Svi parametri koji opisuju utjecaj vjetra definirani su Europskom normom, te su u ovom radu detaljno objašnjeni. Rezne sile i horizontalni pomaci dobiveni su računalnim programom STAAD. Pro. Zaključeno je da analizirana konstrukcija mora biti ograničene visine radi zadovoljavanja uvjeta njenog graničnog stanja uporabljivosti.

Ključne riječi: aerodinamika, čelični stup, reflektori, konstrukcijski eurokodovi

Abstract. It was noticed in practice that designers of steel masts supporting antenna or illumination reflectors have not enough experience with regard to calculating the action of wind forces on that kind of structures according to structural eurocodes. For these structures dynamic analysis should apply with regard to aerodynamics.

In this paper analysis of high steel column bearing illumination of football stadium was presented. Design of this structure is demanding the knowledge of elementary aerodynamics for determine wind forces on structure. This paper presents how to determine wind forces, structural analysis for both ultimate limit states and serviceability limit states and conclusions. Design of wind action was conducted specially for steel column and reflectors. All parameters witch describe wind action are defined in Eurocode and in this paper they are explained in details. Forces and horizontal displacement were obtained using computer program STAAD.Pro. It was concluded that steel column presented in this paper should have limited high in order to satisfy serviceability limit state.

Key words: aerodynamics, mast, reflectors, structural eurocodes

1. Uvod

Poznato je da su konstrukcijski eurokodovi znanstveno utemeljeni. Znači da su u njih ugrađeni najnoviji rezultati znanstvenih istraživanja, te one predstavljaju u mnogim elementima “stanje struke” iz pojedinog područja. U Republici Hrvatskoj su konstrukcijski eurokodovi (EN) u primjeni od 01. siječnja 2009. godine.

Budući da većina konstrukcijskih eurokodova u svojim dodacima samo teorijski objašnjava najvažnije pojmove, u ovom se radu odlučilo predstaviti princip proračuna djelovanja vjetra na konstrukciju visokog čeličnog stupa nosača rasvjete, te djelovanje vjetra na reflektore. Radi boljeg razumijevanja postupak će se provesti kroz numerički primjer za konstrukciju stupa cjevastog poprečnog presjeka promjenjivog promjera na čijem je vrhu smješten komplet od 36 reflektora.

Cilj rada je proračunati minimalnu debljinu stjenke nosača pod uvjetom da se zadovolje kriteriji nosivosti i uporabivosti.

2. Proračun djelovanja vjetra na konstrukciju

2.1. Djelovanje vjetra na stup

Vanjski tlak vjetra w_e djeluje na vanjske površine stupa, a definiran je sljedećim izrazom [1]:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (1)$$

u kome je:

a) $q_p(z_e)$, vršni vanjski tlak na visini z , uključuje prosječne i kratkotrajne promjene brzine vjetra, a preporučena vrijednost određena je jednadžbom:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (2)$$

gdje je:

- $I_v(z)$ – intenzitet turbulencije
- ρ – gustoća zraka ($\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$)
- $v_m(z)$ – prosječna komponenta brzine vjetra
- $c_e(z)$ – koeficijent izloženosti
- q_b – osnovni tlak izazvan brzinom vjetra

Intenzitet turbulencije $I_v(z)$, predstavlja promjenjivu komponentu brzine vjetra koja je definirana kao standardna devijacija turbulencije podijeljena s prosječnom brzinom vjetra, a definiran je jednadžbama:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} \quad \text{za } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (3)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{za } z < z_{\min}$$

z_{\min} – najmanja visina (Tablica 1.)

z_{\max} – 200 m

Turbulentna komponenta brzine vjetra ima prosječnu vrijednost jednaku 0 i standardnu devijaciju σ_v :

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I \quad (4)$$

k_r – koeficijent terena, definira se na sljedeći način:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (5)$$

z_0 – visina hrapave površine (Tablica 1.)

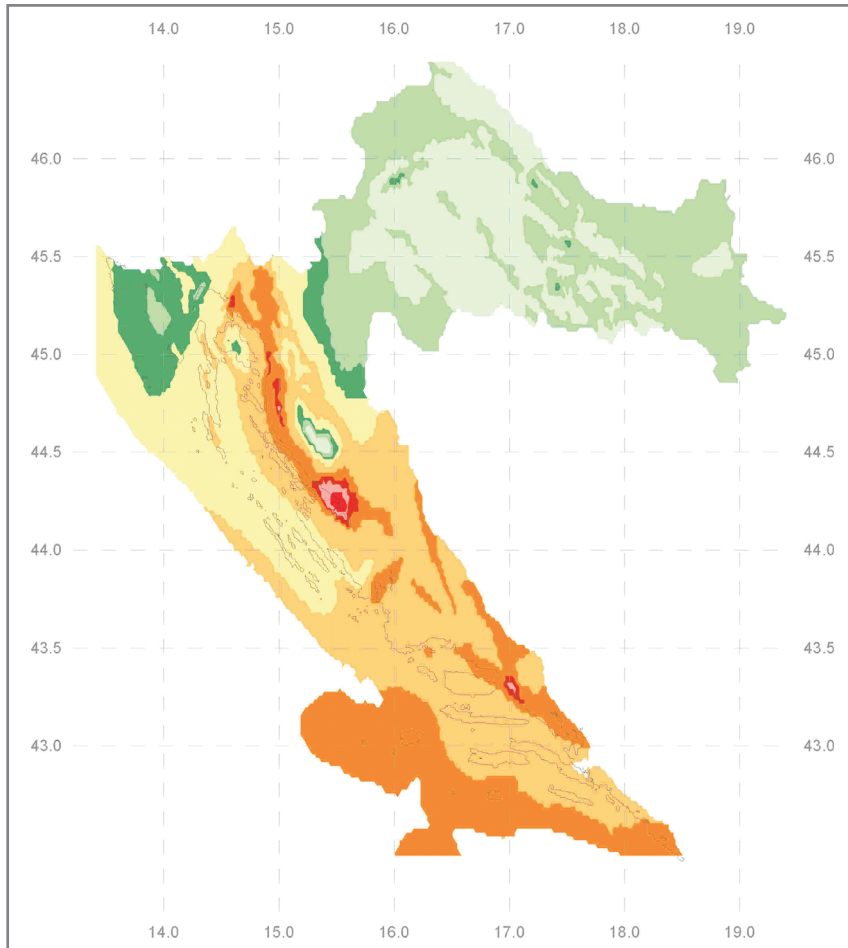
$z_{0,II}$ – 0,05 (za II kategoriju terena, Tablica 1.)

v_b – osnovna brzina vjetra, definirana je kao funkcija temeljne vrijednosti osnovne brzine vjetra, smjera vjetra i godišnjeg doba, a predstavljena je na sljedeći način:

$$v_b = v_{b,0} \cdot c_{dir} \cdot c_{season} \quad (6)$$

Tablica 1. Kategorije terena i pripadne vrijednosti z_0 i z_{min} [1]

Kategorija terena	z_0 [m]	z_{min} [m]
0. more ili priobalne površine izložene otvorenom moru	0,003	1
I. jezera ili ravne i vodoravne površine sa zanemarivom vegetacijom i bez prepreka	0,01	1
II. površine s niskom vegetacijom poput trave i izdvojenih prepreka (drveće, kuće) s razmacima od najmanje 20 visina prepreka	0,05	2
III. područje s jednolikim pokrovom vegetacije ili zgrada ili izdvojenih prepreka s razmacima od najviše 20 visina prepreka (sela, predgrađa, stalne šume)	0,3	5
IV. gradska područja u kojima je najmanje 15% površine izgrađeno i čija prosječna visina zgrada prelazi 15 metara	1,0	10

**Slika 1.** Zemljovid područja opterećenja vjetrom NAD [2]

$v_{b,0}$ – temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra, predstavlja karakterističnu 10-minutnu prosječnu brzinu vjetra na visini 10m iznad terena II. kategorije hrapavosti, čije su vrijednosti dane Nacionalnim dodatkom na zemljovidu područja opterećenja vjetrom, (Slika 1)

c_{dir} – koeficijent smjera vjetra (definirano u [2], preporuča se vrijednost $c_{dir} = 1$)

c_{season} – koeficijent ovisan o godišnjem dobu (definirano u [2], preporuča se vrijednost $c_{season} = 1$)

k_1 – koeficijent turbulencije (definirano u [2], preporuča se vrijednost $k_1 = 1$)

Prosječna brzina vjetra $v_m(z)$, definira se prema izrazu:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (7)$$

$c_r(z)$ – koeficijent hrapavosti terena, koji se izračunava prema sljedećem izrazu:

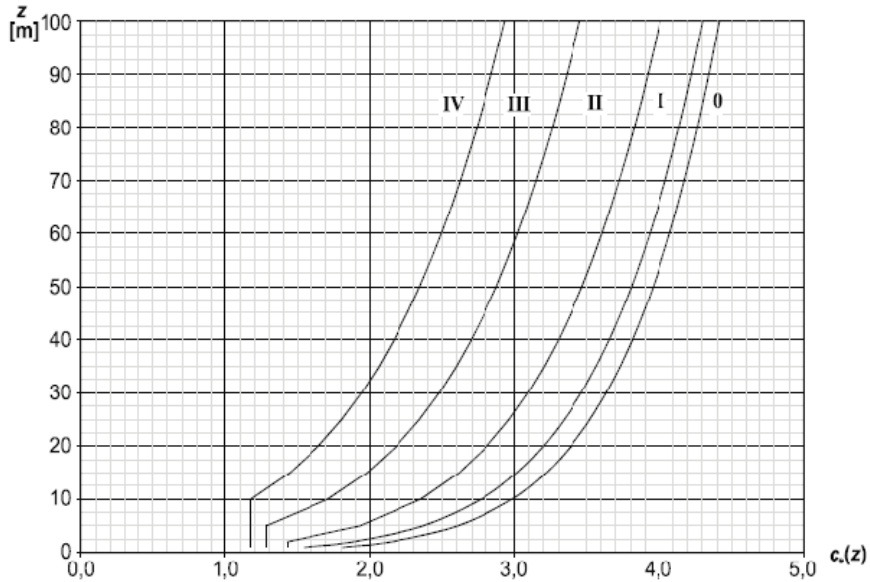
$$\begin{aligned} c_r(z) &= k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{za } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \\ c_r(z) &= c_r(z_{\min}) \quad \text{za } z < z_{\min} \end{aligned} \quad (8)$$

$c_o(z)$ – koeficijent orografije (preporuča se uzeti vrijednost $c_o(z) = 1,0$ osim ako Nacionalnim dokumentom nije drugačije definirano)

Koeficijent izloženosti $c_e(z)$, definiran je sljedećom jednačinom:

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (9)$$

Za ravne terene gdje je $c_o(z) = 1$, koeficijent izloženosti $c_e(z)$ dan je dijagramom prikazanom na Slici 2, a definiran je kao funkcija terena i visine iznad terena.



Slika 2. Ilustracije koeficijenta izloženosti $c_e(z)$ za $c_o(z) = 1$, $k_1 = 1$ prema kategorijama terena [1]

Osnovni tlak izazvan brzinom vjetra q_b , definiran je sljedećom jednažbom:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (10)$$

b) c_{pe} , koeficijent vanjskog tlaka, definiran je sljedećom jednažbom [1]:

$$c_{pe} = c_{p,0} \cdot \Psi_{\lambda\alpha} \quad (11)$$

gdje je:

$c_{p,0}$ – koeficijent vanjskog tlaka

$\Psi_{\lambda\alpha}$ – faktor rubnih efekata

Koeficijent vanjskog tlaka $c_{p,0}$, dan je na Slici 3. u funkciji kuta α za različite vrijednosti Reynoldsovih brojeva (Tablica 2.) [1]:

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{v} \quad (12)$$

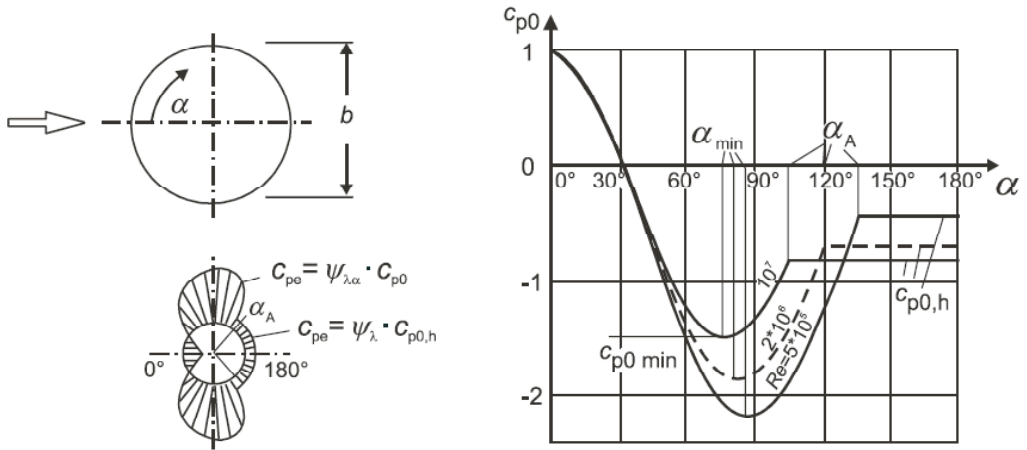
b – promjer stupa

$v(z_e)$ – vršna brzina vjetra, čija je vrijednost:

$$v(z_e) = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p}{\rho}} \tag{13}$$

q_p – vršni vanjski tlak izazvan brzinom vjetra

ν – kinematska viskoznost zraka, $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$



Slika 3. Raspodjela tlaka na valjku pri različitim vrijednostima Reynoldsovih brojeva i beskonačnoj vitkosti [1]

Tablica 2. Karakteristične vrijednosti raspodjele tlaka na valjku za različite vrijednosti Reynoldsovih brojeva i beskonačnoj vitkosti [1]

Re	α_{\min}	$c_{p0,\min}$	α_A	$c_{p0,h}$
$5 \cdot 10^5$	85	-2,2	135	-0,4
$2 \cdot 10^6$	80	-1,9	120	-0,7
10^7	75	-1,5	105	-0,8

gdje je:

- α_{\min} mjesto najmanjeg tlaka [°]
- $c_{p0,\min}$ vrijednost najmanjeg koeficijenta tlaka
- α_A mjesto odvajanja strujanja [°]
- $c_{p0,h}$ koeficijent osnovnog tlaka

Napomena: Za međuvrijednosti se primjenjuje linearna interpolacija

Faktor rubnih efekata $\psi_{\lambda\alpha}$, definiran je sljedećim jednadžbama:

$$\begin{aligned} \psi_{\lambda\alpha} &= 1 && \text{za } 0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{\min} \\ \psi_{\lambda\alpha} &= \psi_\lambda + (1 - \psi_\lambda) \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_A - \alpha_{\min}} \right) \right] && \text{za } \alpha_{\min} < \alpha < \alpha_A \\ \psi_{\lambda\alpha} &= \psi_\lambda && \text{za } \alpha_A < \alpha < 180^\circ \end{aligned} \quad (14)$$

ψ_λ – faktor rubnih efekata, određuje se kao funkcija stupnja ispunjenosti φ i efektivne vitkosti λ (Slika 4.)

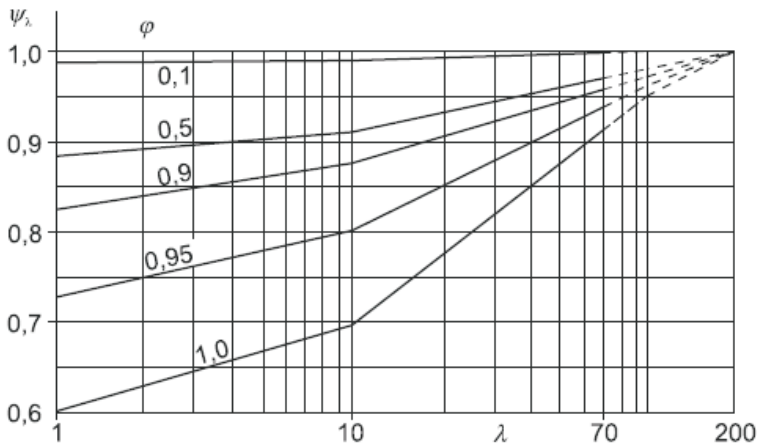
λ – efektivna vitkost, definira se ovisno o dimenzijama konstrukcije prema Slici 4. i Tablici 3.

φ – stupanj ispunjenosti, definiran je sljedećim izrazom:

$$\varphi = \frac{A}{A_c} \quad (15)$$

A – zbroj projiciranih površina elemenata poprečnog presjeka

A_c – ukupna površina poprečnog presjeka



Slika 4. Indikativne vrijednosti faktora rubnih efekata kao funkcije stupnja ispunjenosti i efektivne vitkosti [1]

Tablica 3. Preporučene vrijednosti efektivne vitkosti λ za cilindrične, rešetkaste i poligonalne presjeke konstrukcija [1]

Br.	Pozicija konstrukcije - vjetar normalan na ravninu stranice -	Efektivna vitkost λ
1.		Za poligonalne, pravokutne, oštrorubne poprečne presjeke i rešetkaste konstrukcije: za $\ell \geq 50 \text{ m}$, $\lambda = 1,4 \ell / b$ ili $\lambda = 70$ uzima se manja vrijednost
2.		za $\ell < 15 \text{ m}$, $\lambda = 2 \ell / b$ ili $\lambda = 70$ uzima se manja vrijednost Za kružne cilindre: za $\ell \geq 50 \text{ m}$, $\lambda = 0,7 \ell / b$ ili $\lambda = 70$ uzima se manja vrijednost
3.		za $\ell < 15 \text{ m}$, $\lambda = \ell / b$ ili $\lambda = 70$ uzima se manja vrijednost Za međuvrijednosti ℓ postupa se linearnom interpolacijom
4.		za $\ell \geq 50 \text{ m}$, $\lambda = 0,7 \ell / b$ ili $\lambda = 70$ uzima se veća vrijednost za $\ell < 15 \text{ m}$, $\lambda = \ell / b$ ili $\lambda = 70$ uzima se veća vrijednost Za međuvrijednosti ℓ postupa se linearnom interpolacijom

2.2. Djelovanje vjetra na reflektore

Sila vjetra F_w na reflektore određuje se prema izrazu [1]:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (16)$$

u kome je,

a) $c_s c_d$ faktor konstrukcije, definiran sljedećom jednačbom:

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} \quad (17)$$

gdje je:

z_s – referentna visina (Slika 5,c))

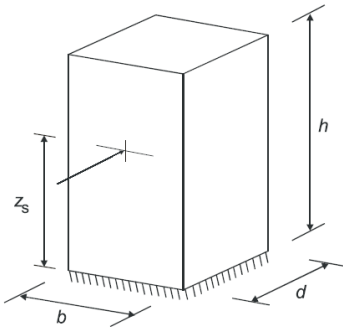
k_p – vršni faktor

$I_v(z)$ – intenzitet turbulencije

B^2 – faktor pozadine

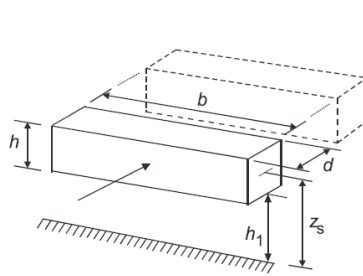
R^2 – faktor rezonantnog odziva

a) vertikalne konstrukcije
(zgrade i sl.)



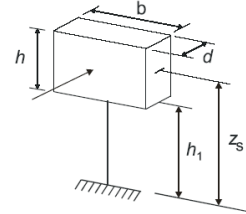
$$z_s = 0,6 \cdot h \geq z_{\min}$$

b) horizontalna konstrukcija
(greda i sl.)



$$z_s = h_1 + \frac{h}{2} \geq z_{\min}$$

c) opterećenje u točki
(panoi i sl.)



$$z_s = h_1 + \frac{h}{2} \geq z_{\min}$$

Slika 5. Prikaz osnovnih oblika konstrukcija i pripadajućih referentnih visina z_s [1]

Faktor pozadine B^2 , kojim se uzima u obzir nemogućnost potpunog djelovanja tlaka vjetra na površinu:

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0,63}} \quad (18)$$

b, h – širina i visina konstrukcije

$L(z_s)$ – dužina turbulencije za referentnu visinu z_s , predstavlja prosječni udar vjetra za prirodne vjetrove:

$$L(z) = L_t \left(\frac{z}{z_t} \right)^\alpha \quad \text{za } z \geq z_{\min}$$

$$L(z) = L(z_{\min}) \quad \text{za } z < z_{\min}$$
(19)

$$z_t = 200 \text{ m}, L_t = 300 \text{ m}, \alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0)$$

Faktor rezonantnog odziva R^2 , kojim se uzima u obzir rezonancija turbulencije i vlastiti oblik vibracija:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b)$$
(20)

δ - ukupno logaritamsko opadanja prigušenja:

$$\delta = \delta_s + \delta_d + \delta_a$$
(21)

δ_s – logaritamsko opadanje konstrukcijskog prigušenja (Tablica 5.)

δ_d – logaritamsko opadanje prigušenja uslijed posebnih uređaja (računa se teoretski ili eksperimentalno)

δ_a – logaritamsko opadanje aerodinamičkog prigušenja za osnovni oblik oscilacija

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e}$$
(22)

n – prirodna frekvencija konstrukcije (Hz) [4]:

$$n = n_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{x_1}}$$
(23)

g – gravitacijsko ubrzanje (9,8 m/s²)

x_1 – maksimalni pomak uslijed vlastite težine nanosene u smjeru vibracija (m)

m_e – ekvivalentna masa po jedinici dužine:

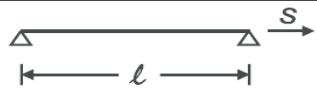
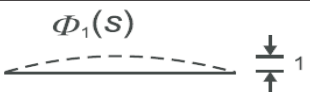
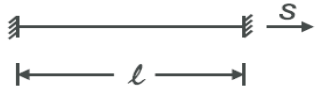
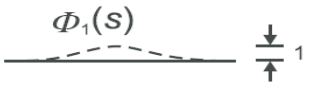
$$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \cdot \Phi_1^2(s) ds}{\int_0^l \Phi_1^2(s) ds}$$
(24)

m – masa po jedinici dužine

l – visina ili raspon konstrukcije ili konstruktivnog elementa

$\Phi_1(S)$ – osnovni vertikalni ton (Tablica 4.)

Tablica 4. Osnovni vertikalni ton [1]

Shema	Oblik osciliranja	$\Phi_1(s)$
		$\sin\left(\pi \cdot \frac{s}{\ell}\right)$
		$\frac{1}{2} \cdot \left[1 - \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{s}{\ell}\right) \right]$

Tablica 5. Približne vrijednosti logaritamskog opadanja konstrukcijskog prigušenja za osnovni oblik δ_s [1]

Vrsta konstrukcije	konstrukcijsko prigušenje, δ_s	
armiranobetonske konstrukcije	0,100	
čelične konstrukcije	0,050	
kombinirane konstrukcije beton + čelik	0,080	
armiranobetonski tornjevi i dimnjaci	0,030	
čelični dimnjaci bez vanjske toplinske izolacije	0,012	
čelični dimnjaci sa vanjskom toplinskom izolacijom	0,020	
čelični dimnjak s unutarnjom cijevi sa vanjskom toplinskom izolacijom ^a	h/b < 18	0,020
	20 ≤ h/b < 24	0,040
	h/b > 26	0,014
čelični dimnjak sa dvije ili više unutarnjih cijevi sa vanjskom toplinskom izolacijom ^a	h/b < 18	0,020
	20 ≤ h/b < 24	0,040
	h/b > 26	0,025
čelični dimnjak s unutarnjom zidanom cijevi	0,070	
čelični dimnjak s unutarnjom cementnom oblogom	0,030	
spojeni čelični dimnjaci bez unutarnjih cijevi	0,015	
užadima pridržan čelični dimnjak bez unutarnje cijevi	0,040	
čelični mostovi + rešetkasti čelični tornjevi	zavareni	0,020
	visoko otporni vijci	0,030
	obični vijci	0,050
spregnuti mostovi	0,040	
betonski mostovi	prednapeti bez pukotina	0,040
	s pukotinama	0,100
drveni mostovi	0,06 – 0,12	
mostovi, aluminijske legure	0,020	
mostovi, staklo ili plastika ojačana vlaknima	0,04 – 0,08	
užad	snop paralelnih žica	0,006
	spiralno upletene žice	0,020
NAPOMENA 1. Vrijednosti za drvo i plastične kompozite su samo okvirne. U slučajevima gdje su aerodinamički učinci značajni za proračun, potrebno je više podataka dobivenih stručnim savjetima (prihvaćeno uz suglasnost nadležnog tijela)		
NAPOMENA 2. Za mostove poduprte užadima, vrijednosti dane u tablici 5. potrebno je reducirati sa 0,75		
^a Za međuvrijednosti h/b može se koristiti linearna interpolacija		

S_L – funkcija spektralne gustoće, predstavlja odnos distribucije vjetra i frekvencije:

$$S_L(z, n) = \frac{6,8 \cdot f_L(z, n)}{[1 + 10,2 \cdot f_L(z, n)]^{5/3}} \quad (25)$$

$f_L(z, n)$ – bezdimenzionalna frekvencija određena prirodnom frekvencijom konstrukcije:

$$f_L(z, n) = \frac{n \cdot L(z)}{v_m(z)} \quad (26)$$

R_h, R_b – funkcije aerodinamičke vodljivosti:

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2\eta_h}) ; R_h = 1 \text{ za } \eta_h = 0 \quad (27)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2\eta_b}) ; R_b = 1 \text{ za } \eta_b = 0$$

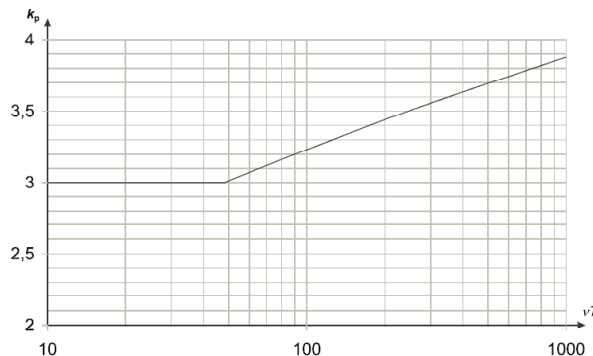
$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}) ; \eta_b = \frac{4,6 \cdot b}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}) \quad (28)$$

Vršni faktor k_p , dobije se prema Slici 6. ili prema sljedećem izrazu:

$$k_p = \max \left[\begin{array}{l} \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} \\ 3 \end{array} \right] \quad (29)$$

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} ; v \geq 0,08 \text{ Hz} \quad (30)$$

$$T = 600 \text{ s}$$



Slika 6. Vrijednosti vršnog faktora k_p [1]

b) Koeficijent sile c_f

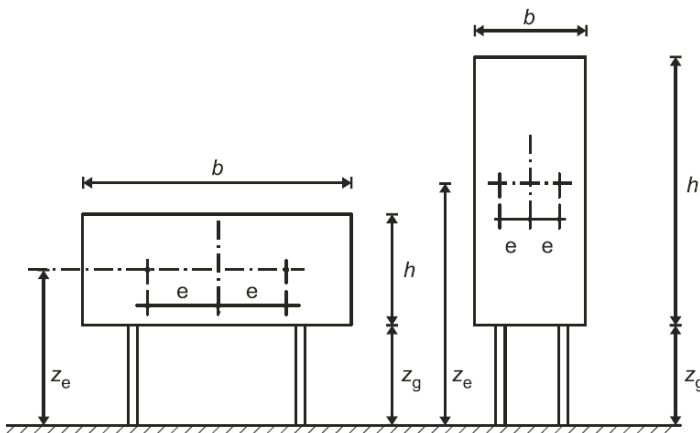
Vrijednost koeficijenta sile za samostojeći pano podignut od tla na visinu z_g , kada je $z_g > h/4$ (Slika 7):

$$c_f = 1,8 \quad (31)$$

Rezultantna sila je okomita na ravninu, a točka djelovanja te sile je u centru panoa s ekscentricitetom e . Preporuča se sljedeća vrijednost ovog ekscentriciteta (Slika 7):

$$e = \pm 0,25 b \quad (32)$$

Ako je pano podignut od tla na visinu manju od četvrtine visine samoga panoa, te ako je $b/h > 1$, takav pano treba smatrati kao da je vertikalni samostojeći zid, te ga analizirati prema [1]. U ovom slučaju utjecaj ekscentriciteta e se zanemaruje.



NAPOMENA 1 referentna visina: $z_e = z_g + h/2$

NAPOMENA 2 referentna površina: $A_{ref} = b \cdot h$

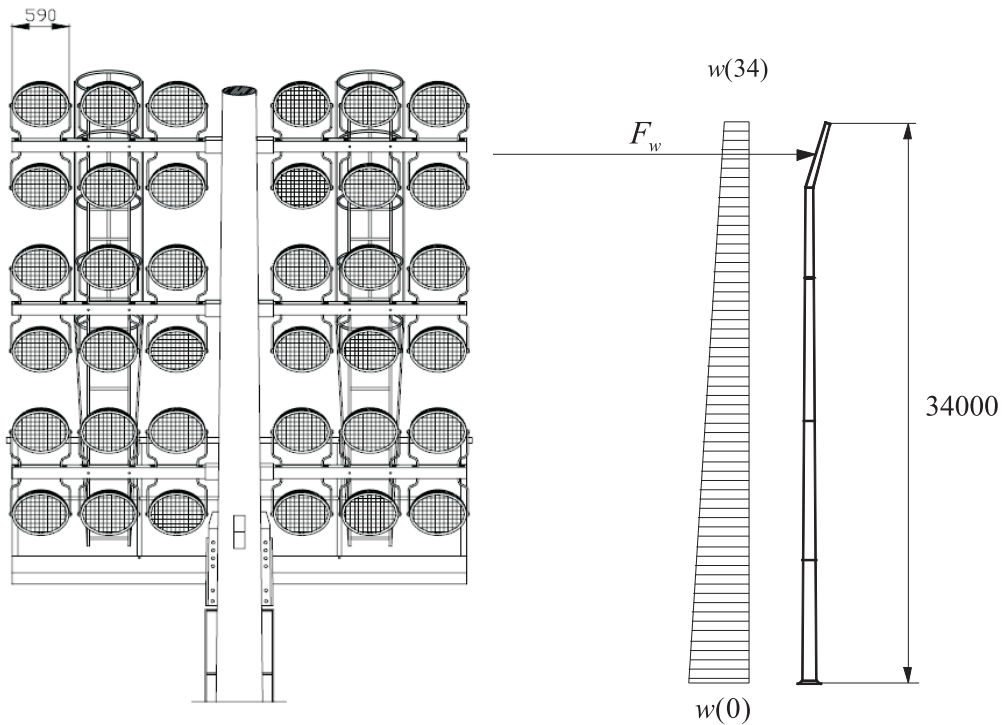
Slika 7. Samostojeći pano podignut od tla na visinu z_g [1]

3. Numerički primjer

Zadana je čelična konstrukcija nosača rasvjete nogometnog stadiona. Sustav rasvjete sastoji se od stupa visine $34m$ cjevastog poprečnog presjeka promjenljivog promjera ($\Phi=96,0cm$ promjer stupa na spoju sa temeljom i $\Phi=29,6cm$ promjer stupa na vrhu). Debljina stjenke poprečnog presjeka je $14mm$. Stup se sastoji od četiri komponente, a najviša komponenta je nagnuta prema terenu pod kutom od

15° u odnosu na vertikalu . Na vrhu stupa je sustav od 36 reflektora snage 2000 W (Slika 8.).

Čelična konstrukcija smještena je na području Rijeke. Prema Nacionalnom dodatku Rijeka pripada terenu II kategorije (Tablica 1), te II području opterećenja vjetrom (Slika 1).



Slika 8. Prikaz stupa i reflektora

3.1. Numeričko određivanje vjetrovnog opterećenja na stup

Prema naprijed danim izrazima dobivaju se sljedeće vrijednosti:

– za II područje opterećenja vjetrom (Slika 1.) vrijedi:

$$v_b = v_{b,0} \cdot c_{dir} \cdot c_{season} = 30,00 \cdot 1,00 \cdot 1,00 = 30,00 \text{ m/s} \quad (6)$$

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 30,00^2 = 562,50 \text{ N/m}^2 = 0,563 \text{ kN/m}^2 \quad (10)$$

– za kategoriju terena II (Tablica 1.) $\rightarrow z_0 = 0,05 \text{ m}$; $z_{min} = 2,00 \text{ m}$

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left(\frac{0,05}{0,05} \right)^{0,07} = 0,19 \quad (5)$$

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I = 0,19 \cdot 30,00 \cdot 1,00 = 5,70 \text{ m/s} \quad (4)$$

– određivanje koeficijenta λ (Tablica 3.):

$$l < 15 \text{ m} \rightarrow \lambda_1 = l/b = 15,00/0,628 = 23,89$$

$$b_{sr} = (0,960 + 0,296) / 2 = 0,628$$

$$l \geq 50 \text{ m} \rightarrow \lambda_2 = 0,70 \cdot l/b_{sr} = 50,00/0,628 = 55,73$$

Za $l = 34 \text{ m}$ vrijedi linearna interpolacija:

$$\lambda = \lambda_1 + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{l_2 - l_1} (l - l_1) = 23,89 + \frac{(55,73 - 23,89)}{50 - 15} (34 - 15) = 41,20 \rightarrow \psi_\lambda = 0,85$$

- Spoj stupa s temeljom ($z = 0$) dobije se: ($z < z_{\min}$)

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) = k_r \cdot \ln \left(\frac{z_{\min}}{z_0} \right) = 0,19 \cdot \ln \left(\frac{2,00}{0,05} \right) = 0,701 \quad (8)$$

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b = 0,701 \cdot 1,00 \cdot 30,00 = 21,03 \text{ m/s} \quad (7)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) = \frac{5,70}{21,03} = 0,271 \quad (3)$$

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v_m^2(z) = [1 + 7 \cdot 0,271] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 21,03^2 = 800,68 \text{ N/m}^2 \quad (2)$$

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} = \frac{800,68}{562,50} = 1,423 \quad (9)$$

$$v(z) = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 800,68}{1,25}} = 35,79 \text{ m/s} \quad (13)$$

$$\text{Re} = \frac{b \cdot v(z_e)}{v} = \frac{0,96 \cdot 35,79}{15 \cdot 10^{-6}} = 2,29 \cdot 10^{-6} \quad (12)$$

– linearna interpolacija (Tablica 2)

$$\alpha_{\min} = 79,82^\circ; \alpha_A = 119,45^\circ$$

$$c_{p,o,\min} = -1,89; c_{p,0,h} = -0,70$$

$$c_{pe}(0) = \frac{2}{3} \cdot c_{p,0} \cdot \frac{30^\circ}{360^\circ} \cdot 2 - (c_{p,0,h}) \cdot \frac{180^\circ - \alpha_A}{360^\circ} \cdot \psi_\lambda \cdot 2 \quad (\text{Slika 3})$$

$$c_{pe}(0) = \frac{2}{3} \cdot 1 \cdot \frac{30^\circ}{360^\circ} \cdot 2 - (-0,70) \cdot \frac{180^\circ - 119,45^\circ}{360^\circ} \cdot 0,85 \cdot 2 = 0,11 + 0,20 = 0$$

$$\dot{w}_e(0) = 800,68 \cdot 0,31 = 0,25 \text{ kN/m}^2 \quad (1)$$

$$w_e(0) = D(0) \cdot \dot{w}_e = 0,96 \cdot 0,25 = 0,24 \text{ kN/m}$$

- Vrh stupa ($z = 34 \text{ m}$) dobije se: ($z_{\min} \leq z < z_{\max}$)

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,19 \cdot \ln\frac{34,00}{0,05} = 1,239 \quad (8)$$

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b = 1,239 \cdot 1,00 \cdot 30,00 = 37,18 \text{ m/s} \quad (7)$$

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{5,17}{37,18} = 0,153 \quad (3)$$

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v_m^2(z) = [1 + 7 \cdot 0,153] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 37,18^2 = 1790,86 \text{ N/m}^2 \quad (2)$$

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} = \frac{1790,86}{562,50} = 3,184 \quad (9)$$

$$v(z) = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1790,86}{1}} = 53,53 \text{ m/s} \quad (13)$$

$$\text{Re} = \frac{b \cdot v(z_e)}{v} = \frac{0,296 \cdot 53,53}{15 \cdot 10^{-6}} = 1,056 \cdot 10^{-6} \quad (12)$$

– linearna interpolacija (Tablica 2)

$$\alpha_{\min} = 83,15^\circ; \alpha_A = 129,44^\circ$$

$$c_{p,o,\min} = -2,09; c_{p,0,h} = -0,51$$

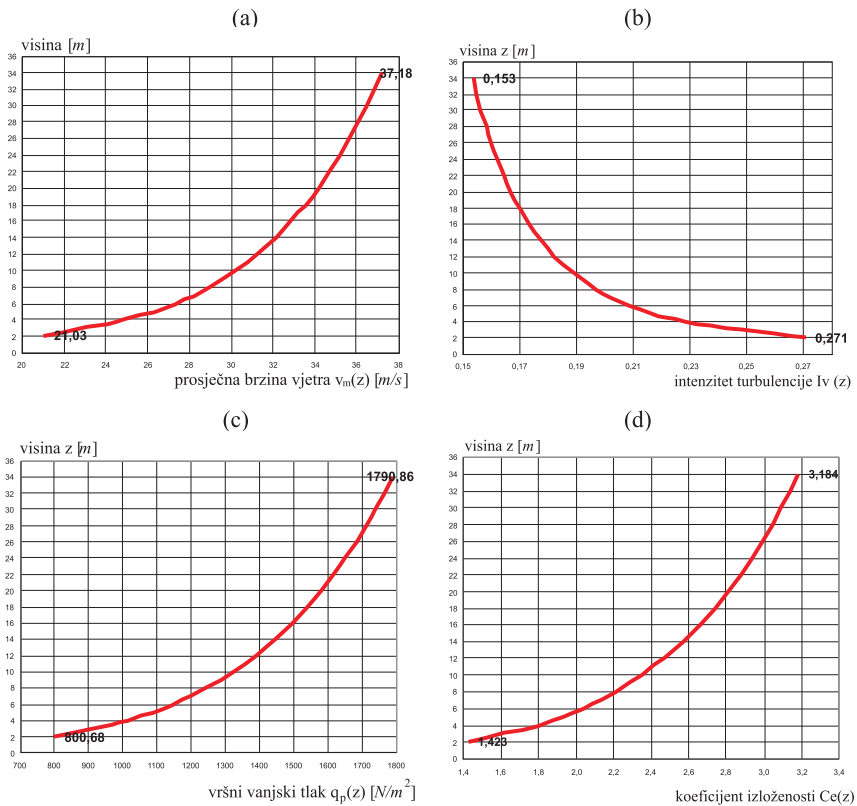
$$c_{pe}(34) = \frac{2}{3} \cdot c_{p,0} \cdot \frac{30^\circ}{360^\circ} \cdot 2 - (c_{p,0,h}) \cdot \frac{180^\circ - \alpha_A}{360^\circ} \cdot \psi_\lambda \cdot 2 \quad (\text{Slika 3})$$

$$c_{pe}(34) = \frac{2}{3} \cdot 1 \cdot \frac{30^\circ}{360^\circ} \cdot 2 - (-0,51) \cdot \frac{180^\circ - 129,44^\circ}{360^\circ} \cdot 2 \cdot 0,85 = 0,11 + 0,12 = 0,23$$

$$\dot{w}_e(34) = 1790,86 \cdot 0,23 = 0,41 \text{ kN/m}^2$$

$$w_e(34) = D(34) \cdot \dot{w}_e = 0,296 \cdot 0,41 = 0,12 \text{ kN/m} \quad (1)$$

Na Slici 9. je prikazan prirast prosječne brzine vjetra (a), intenziteta turbulencije (b), vršnog vanjskog tlaka (c) i koeficijenta izloženosti (d) po visini cijelog stupa. U proračunu su prikazane vrijednosti samo za spoj stupa sa temeljom i za vrh stupa.



Slika 9. Prosječna brzina vjetra (a), intenzitet turbulencije (b), vršni vanjski tlak (c) i koeficijent izloženosti (d)

3.2. Numeričko određivanje vjetrovnog opterećenja na reflektor

Sila vjetra na reflektore dobije se prema izrazu (16):

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

Maksimalni pomak uslijed vlastite težine nanese u smjeru vibracija (dobiveno računalnim programom STAAD.Pro):

$$x_1 = 0,11 \text{ m}$$

Da bi se dobila funkcija spektralne gustoće potrebno je najprije pronaći osnovnu prirodnu frekvenciju konstrukcije:

$$n_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{x_1}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{9,81}{0,11}} = 1,503 \text{ Hz} \quad (23)$$

stup: 6,000 kg

reflektori: 2,000 kg

Masa po jedinici dužine:

$$m = \frac{G}{g \cdot h} = \frac{80.000}{9,81 \cdot 34} = 239,85 \text{ kg/m} \quad (33)$$

Ekvivalentna masa po jedinici dužine:

NAPOMENA: U svrhu ovog proračuna ekvivalentna masa po jedinici dužine nije računata prema izrazu (24) već je pojednostavljena. Uzeta je konstantna vrijednost od vrha do dna stupa.

$$m_e = m = 239,85 \text{ kg/m}$$

Logaritamsko opadanje konstrukcijskog prigušenja – za čeličnu konstrukciju (Tablica 5.):

$$\delta_s = 0,05$$

Logaritamsko opadanje prigušenja uslijed posebnih uređaja (na stup nisu ugrađeni nikakvi uređaji za prigušenje):

$$\delta_d = 0$$

Logaritamsko opadanje aerodinamičkog prigušenja za osnovni oblik oscilacija:

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e} = \frac{1,8 \cdot 1,25 \cdot (6 \cdot 0,59) \cdot 37,18}{2 \cdot 1,503 \cdot 239,85} = 0,41 \quad (22)$$

Ukupno logaritamsko opadanje prigušenja δ :

$$\delta = \delta_a + \delta_s = 0,41 + 0,05 = 0,46 \quad (21)$$

Faktor rezonantnog odziva konstrukcije R^2 :

$$f_L(z, n) = \frac{n \cdot L(z)}{v_m(z)} = \frac{1,503 \cdot 119,39}{37,18} = 4,825 \quad (26)$$

$$S_L(z, n) = \frac{6,8 \cdot f_L(z, n)}{[1 + 10,2 \cdot f_L(z, n)]^{5/3}} = \frac{6,8 \cdot 4,825}{[1 + 10,2 \cdot 4,825]^{5/3}} = 0,048 \quad (25)$$

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{4,6 \cdot (6 \cdot 0,59)}{119,39} \cdot 4,825 = 0,658 \quad \eta_h = \eta_h = 0,658 \quad (28)$$

$$R_h = R_b = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2\eta_h}) = \frac{1}{0,658} - \frac{1}{2 \cdot 0,658^2} (1 - e^{-2 \cdot 0,658}) = 0,675 \quad (27)$$

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b) = \frac{\pi^2}{2 \cdot 0,46} \cdot 0,048 \cdot 0,675^2 = 0,235 \quad (20)$$

Faktor pozadine B^2 (dozvoljava se bez proračuna uzeti $B = 1$, kada je vrijednost faktora konstrukcije $c_s c_d$ na strani sigurnosti):

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0,63}} = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left(\frac{2 \cdot 6 \cdot 0,59}{119,39} \right)^{0,63}} = 0,868 \quad (18)$$

Frekvencija i vršni faktor:

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} = 1,503 \sqrt{\frac{0,235}{0,868 + 0,235}} = 0,694 \text{ Hz} \quad (30)$$

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} = \sqrt{2 \cdot \ln(0,694 \cdot 600)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(0,694 \cdot 600)}} = 3,650 \quad (29)$$

Faktor konstrukcije:

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} = \frac{1 + 2 \cdot 3,65 \cdot 0,153 \cdot \sqrt{0,868 + 0,235}}{1 + 7 \cdot 0,153} = 1,05 \quad (17)$$

Koeficijent sile:

– komplet od 36 reflektora se aproksimira kao samostojeći pano podignut na visinu od 34 m

$$c_f = 1,8 \quad (31)$$

Referentna površina:

- budući da samostojeći pano tvore reflektori između kojih je omogućeno strujanje vjetra, referentna površina iznosi:

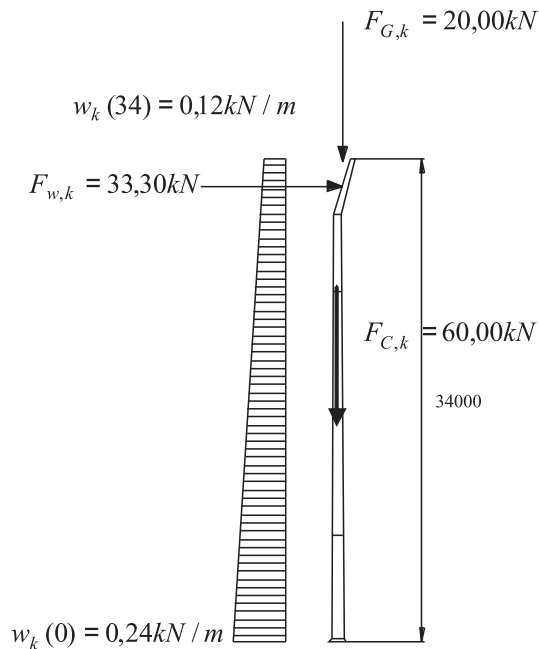
$$A_{ref} = A_{reflektora} = 36 \cdot 0,2952 \cdot \pi = 9,8 \text{ m}^2 \quad (33)$$

Vršni vanjski tlak na visini $z = 34$ m:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v_m^2(z) = [1 + 7 \cdot 0,153] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 37,18^2 = 1790,86 \text{ N/m}^2 \quad (2)$$

Konačno je moguće izračunati vrijednost sile vjetra F_w (Slika 10.):

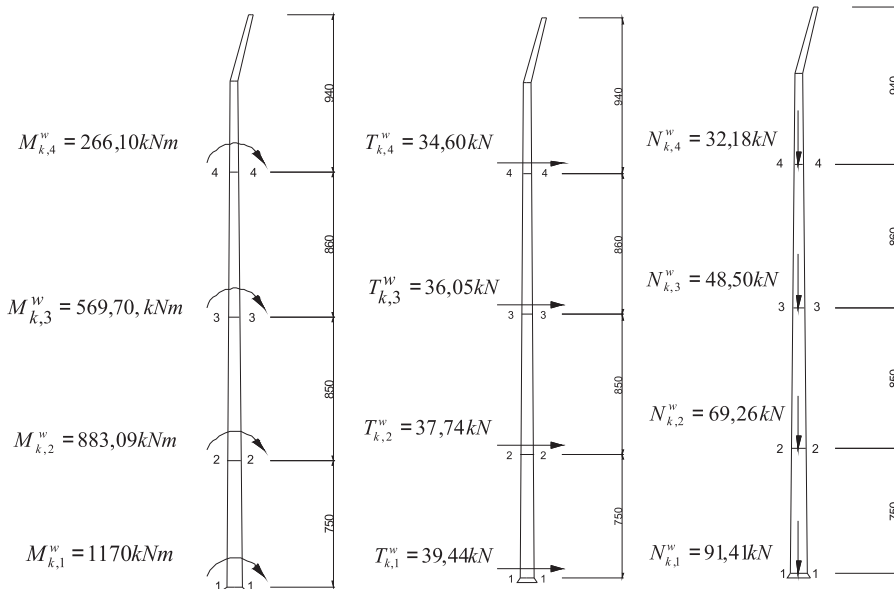
$$F_w = c_s \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} = 1,05 \cdot 1,8 \cdot 1.790,68 \cdot 9,84 = 33.302,35 \text{ N} = 33,30 \text{ kN} \quad (16)$$



Slika 10. Shematski prikaz karakterističnih vrijednosti djelovanja

4. Dimenzioniranje stupa za krajnje granično stanje prema reznim silama (Slika 11.)

Materijal stupa je čelik kvalitete S275 za debljinu elementa $t \leq 40$ m.



Slika 11. Karakteristične vrijednosti reznih sila u presjecima 1,2,3,4

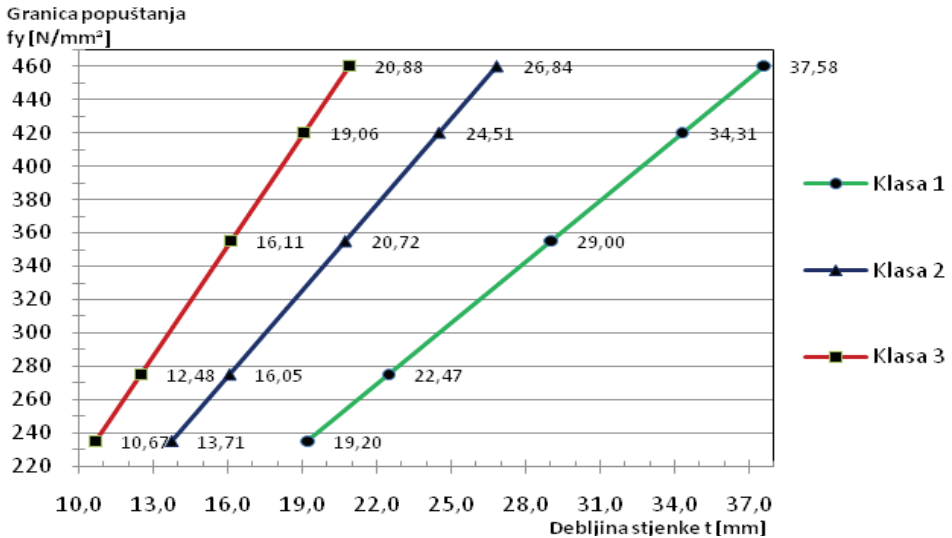
4.1. Proračun minimalne debljine stjenke nosača

Usvaja se poprečni presjek klase 3. Unutarnje sile i otpornost poprečnog presjeka računaju se prema teoriji elastičnosti. Otpornost poprečnog presjeka je postignuta kada rub presjeka dosegne granicu popuštanja f_y . Poprečni presjek ili neki njegov dio neće se lokalno izbočiti prije dosezanja granične nosivosti. Povećanjem granice popuštanja i promjenom klase presjeka iz klase 3 u klasu 1 ili 2 dolazi do povećanja debljine stjenke poprečnog presjeka (Slika 12.) Iz uvjeta za treću klasu poprečnog presjeka određuje se debljina stjenke [3]:

$$\frac{D}{t} \leq 90 \varepsilon^2, \text{ gdje je } \varepsilon^2 = \frac{235}{f_y} = \frac{235}{275} = 0,85 \quad (34)$$

$$t \geq \frac{D}{90 \varepsilon^2} = \frac{960}{90 \cdot 0,85} = 12,54 \text{ mm}$$

Usvaja se $t = 14,00$ mm



Slika 12. Dijagram zavisnosti debljine stijenke od vrste čelika

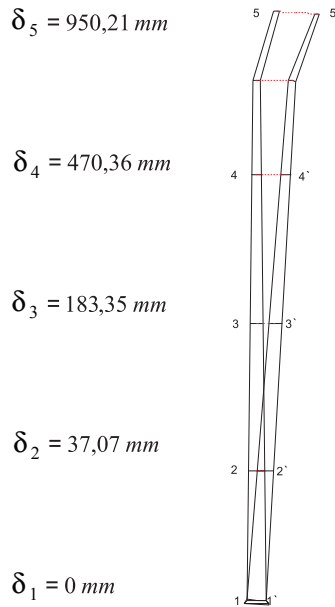
4.2. Računska otpornost poprečnog presjeka “1-1”

Za karakteristične vrijednosti reznih sila napravljeni su proračuni otpornosti poprečnog presjeka “1-1” u spoju stupa s temeljom [5]. Ove provjere nisu prekoračile računске vrijednosti za otpornost poprečnog presjeka, ali u ovom primjeru neće biti prikazani budući da stup nije zadovoljio uvjete za granično stanje uporabivosti koji slijedi u poglavlju 5.

5. Dimenzioniranje stupa za granično stanje uporabivosti

5.1. Računske vrijednosti horizontalnih pomaka vrha stupa

Horizontalni pomaci čeličnog stupa provjereni su u programskom paketu STAAD.Pro za karakteristične vrijednosti reznih sila na mjestima spajanja segmenata konstrukcije (Slika 13.). Proračun je dobiven prema teoriji II. reda, te su u obzir uzeti promjenjivi momenti tromosti stupa. Debljina stijenke konstantna je od temelja do vrha stupa.



Slika 13. Horizontalni pomaci stupa dobiveni programskim paketom STAAD.Pro za karakteristične vrijednosti reznih sila

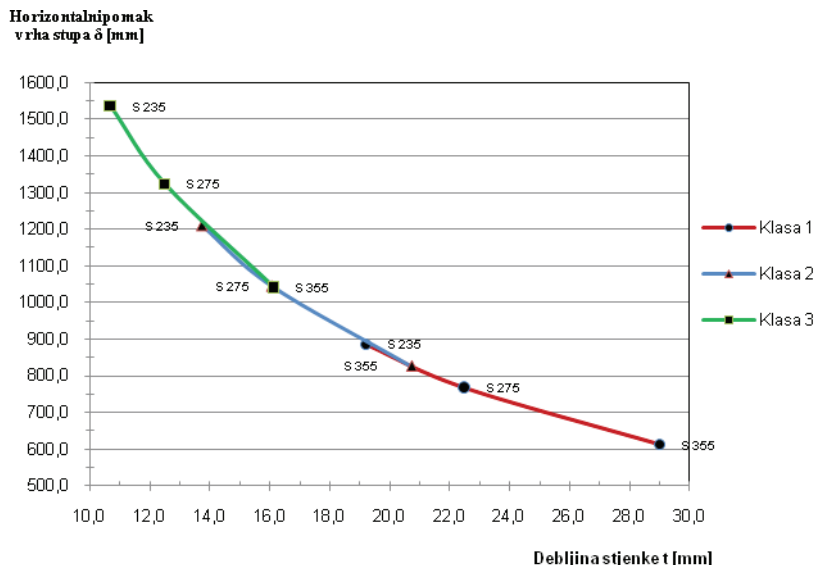
Dopuštene vrijednosti horizontalnog pomaka na vrhu stupa za konzolni nosač [3]:

$$\delta_{dop} = \frac{2L}{300} = \frac{2 \cdot 34000}{300} = 226,67 \text{ mm} \quad (35)$$

$$\delta_{max} = \delta_5 \leq \delta_{dop} \rightarrow 950,21 \text{ mm} > 226,67 \text{ mm} \quad (36)$$

Budući da su horizontalni pomaci čeličnog stupa prekoračili vrijednosti dopuštenih pomaka, bilo bi neophodno promijeniti krutost poprečnog presjeka. Ukoliko bi presjek svrstali u 1 ili 2 klasu za istu čvrstoću materijala S275, došlo bi do povećanja debljine stjenke t (Slika 14.).

Komentar: Ako je odnos $\frac{D}{t} > 90 \epsilon^2$, poprečni presjek je klase 4. Budući da se za klasu 4 u slučaju cjevastog poprečnog presjeka ne može odrediti reducirana površina poprečnog presjeka A_{eff} , projektant se u tom slučaju upućuje na europsku normu EN 1993-1-6: *Čvrstoća i stabilnost ljuškastih konstrukcija*, te se stup tretira u proračunu kao cilindrična ljuska. Ovakav način uštede materijala se dopušta samo ako je za konstrukciju zadovoljen uvjet graničnog stanja uporabivosti. Obično je u praksi, što je pokazano i ovim numeričkim primjerom, ovaj uvjet graničnog stanja uporabivosti mjerodavan za dimensioniranje ovakve cijevi.

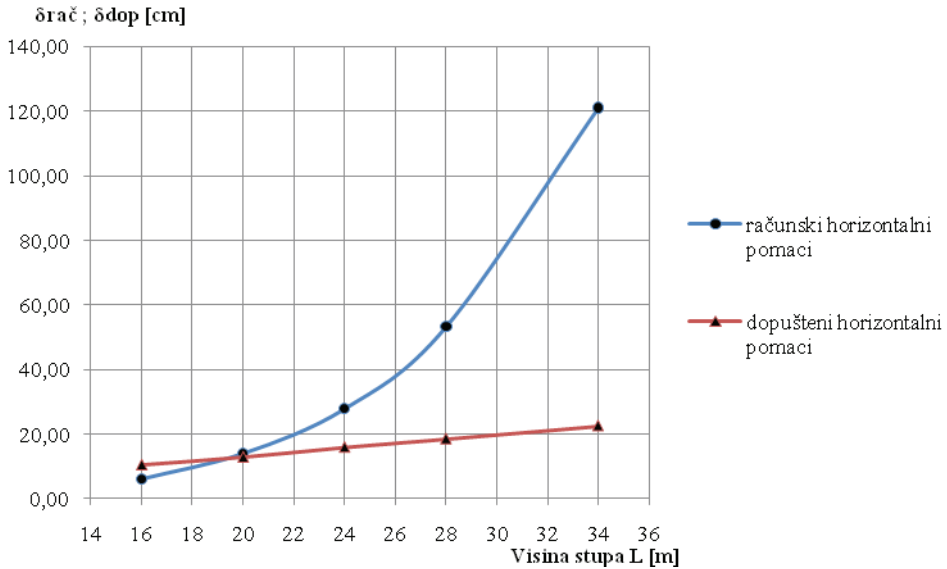


Slika 14. Dijagram zavisnosti debljine stijenke i horizontalnog pomaka vrha stupa

Kako za danu visinu konstrukcije nisu zadovoljili kriteriji graničnog stanja uporabivosti, provedena je analiza horizontalnih pomaka za stupove manjih visina. Došlo se do zaključka da je maksimalna dozvoljena visina stupa sa istim uvjetima opterećenja približno $L = 19$ m (Tablica 6, Slika 15.) Ukoliko je potrebno izvesti stup veće visine, neophodno je promijeniti njegov statički sustav [6].

Tablica 6. Vrijednosti računskih i dopuštenih horizontalnih pomaka s obzirom na visinu stupa

L [m]	$\delta_{\text{rač}}$ [cm]	δ_{dop} [cm]
16	6,09	10,6
20	14,00	13,0
24	27,85	16,0
28	53,27	18,6
34	95,02	22,6



Slika 15. Dijagram zavisnosti horizontalnih pomaka i visine stupa

6. Zaključak

Djelovanje vjetra na konstrukcije visokih čeličnih stupova predstavlja kompleksan problem iz aspekta izračuna proračunskih sila djelovanja vjetra na takve konstrukcije. Iz tog razloga je u ovom radu predstavljen princip proračuna djelovanja vjetra na konstrukciju stupa, te na komplet od 36 reflektora koji se promatra kao samostojeći pano podignut od tla na određenu visinu.

Cilj je dobiti konstrukciju stupa sa što tanjim stjenkama pod uvjetom zadovoljenja graničnog stanja nosivosti i graničnog stanja uporabivosti. Za debljinu stjenke $t = 14,00\text{mm}$, horizontalni pomaci su prekoračili dopuštene vrijednosti pomaka, pri čemu je bilo neophodno promijeniti krutost poprečnog presjeka. Uvrštavanjem presjeka u 1 ili 2 klasu za istu čvrstoću materijala, dobili smo neželjeno povećanje debljine stjenke. Za debljinu stjenke od $14,00\text{mm}$ dozvoljena je maksimalna visina stupa od $L = 19,00\text{m}$. Ukoliko je iz konstruktivnih razloga potrebno izvesti stup veće visine, neophodno je promijeniti statički sustav.

Literatura

- [1] EN 1991-1-4: 2005, *Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions*, CEN, Bruxelles, 2005
- [2] HRN ENV 1991-2-4:2004, *Nacionalni dokument za primjenu u Republici Hrvatskoj*
- [3] EN 1993-1-1: 2005, *Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*, CEN, Bruxelles, 2005
- [4] Paz, M., *Structural Dynamics, Theory & Computation*, VNR, New York, 1980
- [5] Markulak, D., *Proračun čeličnih konstrukcija prema EN 1993-1-1*, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet, Osijek, 2008.
- [6] EN 1993-3-1: 2006, *Design of steel structures – Part 3-1: Towers, masts and chimneys-Towers and masts*, CEN, Bruxelles, 2006

Effect of damage on chloride penetration profiles in concrete structures

Utjecaj oštećenja betonske konstrukcije na profile koncentracije klorida

Joško Ožbolt*, Gojko Balabanić*, Goran Periškić**

Abstract. In the present paper a current status of development of a 3D numerical chemo-hygro-thermo-mechanical model for concrete is presented. In the model the interaction between the non-mechanical (distribution of temperature, humidity, oxygen and chloride) and mechanical properties of concrete (damage) is accounted for. The formulation of the model and its implementation into a 3D finite element code are briefly discussed. The formulation is restricted to the processes up to the depassivation of reinforcement. The application of the model is illustrated on one numerical example in which the transient 3D FE analysis of RC slab is carried out in order to demonstrate the influence of damage of concrete on depassivation time of reinforcement. In the analysis the load free and previously loaded RC slabs are exposed to the aggressive influence of sea water. Due to external load, the loaded beam was damaged before the exposure. Consequently, its depassivation time is much shorter than the depassivation time of companion slab, which was load free. The reason is due to the cracking of concrete, which significantly accelerates processes that are relevant for depassivation of reinforcement. The numerical results are in good agreement with experimental observations.

Key words: Concrete, Damage, Corrosion, Chemo-hygro-thermo-mechanical model, Microplane model, Transport processes, Finite element analysis.

* Faculty of Civil Engineering, University of Rijeka, V.C. Emina 5, 51000 Rijeka, Croatia,
E-mail: josko.ozbolt@gradri.hr, gojko.balabanic@gradri.hr

** Institute of Construction Materials, University of Stuttgart, Pfaffenwaldring 4, 70550 Stuttgart, Germany,
E-mail: periskic@iwb.uni-stuttgart.de

Sažetak. U radu je predstavljen kemo – higro – termo – mehanički model betona u trenutnom stanju razvoja. U modelu je uzeta u obzir interakcija nemehaničkih (raspodjela temperature, vlažnosti, kisika i klorida) i mehaničkih svojstava betona (oštećenje) i kratko je diskutirana njegova formulacija i 3-D implementacija pomoću konačnih elemenata. Formulacija modela je ograničena na procese prije depasivacije armature. Primjena modela je ilustrirana na numeričkom primjeru u kojem se analizira utjecaj oštećenja ploče izložene agresivnim djelovanju mora na vrijeme depasivacije armature. Zbog oštećenja grede, uslijed vanjskog opterećenja, vrijeme depasivacije je mnogo kraće u odnosu na neoštećenu gredu. Razlog tome je pojava pukotina u betonu koje značajno ubrzavaju procese koji su bitni za depasiviranje armature. Numerički rezultati se dobro slažu sa eksperimentalnim opažanjima.

Ključne riječi: beton, oštećenje, korozija, kemo – higro – termo – mehanički model, mikroravninski model, transportni procesi, konačni elementi.

1. Introduction

Chloride-induced corrosion of steel bars in reinforced concrete is one of the major causes for deterioration of reinforced concrete (RC) structures. Therefore, durability of RC structures is directly influenced by corrosion of reinforcement. It is well known that RC structures, which are exposed to aggressive environmental conditions, such as structures that are close to the sea or highway bridges and garages exposed to de-icing salts, very often exhibit damage due to corrosion [1]. This damage is usually manifested in the form of cracking and spalling of concrete cover, which is caused by the expansion of corrosion products around the reinforcement bars. Reparation of corroded concrete structures is usually related with relatively high direct and indirect costs. Therefore, to predict durability of RC structure it is important to have a numerical tool, which can realistically model corrosion process and its consequences for the structural safety.

To estimate reduction of the cross-section of reinforcement and to predict the increase of the volume of the corrosion product it is necessary to know the corrosion rate, e.g. corrosion current density in the corrosion unit. The calculation of corrosion current density requires modelling of the following physical and electrochemical processes: (1) Transport of capillary water, oxygen and chloride through the concrete cover; (2) Immobilization of chloride in the concrete; (3) Transport of OH^- ions through electrolyte in concrete pores and (4) Cathodic and anodic polarization. These processes can be described by non-linear partial differential equations [2]. The importance of a three-dimensional (3D) numerical model, which can realistically simulate the corrosion and its interaction with mechanical properties of concrete is obvious. In the model the results of corrosion, such as expansion of corrosion product or the reduction of the cross-section of

reinforcement, should have an effect on the mechanical properties of concrete structure. On the other hand, the mechanical properties, such as strength or fracture energy, should also influence the corrosion process.

For the modelling of transport processes in concrete and their interaction with mechanical properties, currently exists two groups of models [2, 3, 4]: (1) physical, which simulate the entire chemical and physical processes during aging of concrete and (2) phenomenological, in which mechanical properties of concrete are not directly related to the chemical and physical processes in concrete. The models from the first group are rather complex [2, 5], therefore, in engineering practice are almost exclusively used phenomenological models. Presently, there is sufficient knowledge related to the chemical and physical processes, which lead to corrosion of reinforcement [1, 2, 5, 6]. Although in the last two decades significant progress in the modelling of quasi-brittle materials has been reached, due to the complexity of the problem, computational modelling of damage processes is still a challenging task. This is especially true for the modelling of the influence of damage on transport processes in concrete.

2. Mathematical formulation of non-mechanical and mechanical processes

Assuming that the hydration process in concrete is completed, the mathematical model for description of transport processes in space \mathbf{x} and time t includes the following state variables: volume fraction of pore water in concrete, mass concentration of oxygen in pore water, mass concentration of free chloride in pore water, content of bound chloride per mass of hydration product and temperature.

2.1. Transport of capillary water

Transport of capillary water is described in terms of volume fraction of pore water in concrete by Richard's equation [7], based on the assumption that transport processes take place in aged concrete:

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \nabla \cdot [D_w(\theta_w) \nabla \theta_w] \quad (1)$$

where θ_w is volume fraction of pore water (m^3 of water / m^3 of concrete) and $D_w(\theta_w)$ is capillary water diffusion coefficient (m^2/s).

2.2. Transport of oxygen

Assuming that oxygen does not participate in any chemical reaction before depassivation of steel, transport of oxygen through concrete is considered as a convective diffusion problem [7]:

$$\theta_w \frac{\partial C_o}{\partial t} = \nabla [\theta_w D_o(\theta_w) \nabla C_o] + D_w(\theta_w) \nabla \theta_w \nabla C_o \quad (2)$$

where C_o is oxygen concentration in pore solution (kg of oxygen/m³ of pore solution) and $D_o(\theta_w)$ is the effective oxygen diffusion coefficient.

2.3. Transport of chloride ions

Transport of chloride ions before steel depassivation through a non-saturated concrete occurs as a result of convection, diffusion and physically and chemically binding by cement hydration product [7]:

$$\theta_w \frac{\partial C_c}{\partial t} = \nabla [\theta_w D_c(\theta_w, T) \nabla C_c] + D_w(\theta_w) \nabla \theta_w \nabla C_c - \frac{W_{gel}}{1000} \cdot \frac{\partial C_b}{\partial t} \quad (3a)$$

$$\frac{\partial C_{cb}}{\partial t} = k_r (\alpha C_c^\beta - C_{cb}) \quad (3b)$$

where C_c is concentration of free chloride dissolved in pore water (kgCl/m³ pore solution), $D_c(\theta_w, T)$ is the effective chloride diffusion coefficient (m²/s), T is temperature (K), W_{gel} is a content of cement gel in concrete (kg_{gel}/m³ of concrete) C_{cb} is content of bound chloride per mass of cement gel (gCl/kg_{gel}), k_r is binding rate coefficient, $\alpha = 3.57$ and $\beta = 0.38$ are constants.

2.4. Heat transport in concrete

Based on the constitutive law for heat flow and conservation of energy, the equation which describes distribution of temperature T in continuum reads:

$$\lambda \Delta T + W(T) - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

where λ is thermal conductivity (W/(m·K)), c is heat capacity per unit mass of concrete (J/(K·kg)), ρ is mass density of concrete (kg/m³) and W is internal source of heating (W/m³). It is assumed that the heat capacity and thermal conductivity are constant concrete parameters.

2.5. Equilibrium equation

The governing equation for the mechanical behaviour of a continuous body in case of static loading condition reads:

$$\nabla[D_m(u, \theta_w, T)\nabla u] + \rho b = 0. \quad (5)$$

where D_m = material stiffness tensor and ρb = specific volume load. It is assumed that the material stiffness depends on displacement field, u , water content and temperature.

3. Chemo-hydro-thermo-mechanical coupling

In the mechanical part of the model the total strain tensor ε_{ij} is decomposed as:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^m + \varepsilon_{ij}^T + \varepsilon_{ij}^w + \varepsilon_{ij}^{corr}, \quad \varepsilon_{ij}^m = \varepsilon_{ij} - (\varepsilon_{ij}^T + \varepsilon_{ij}^w + \varepsilon_{ij}^{corr}) \quad (6)$$

where ε_{ij}^m = mechanical strain, ε_{ij}^T = thermal strain, ε_{ij}^w = hygro strain (swelling - shrinking) and ε_{ij}^{corr} = strain due to expansion of corrosion product. Note that ε_{ij}^{corr} applies only on contact layer between reinforcement surface and concrete and it is activated after depassivation of steel. In general, the mechanical strain component can be decomposed into elastic, plastic and damage part. The sources of mechanical strains are external load, hygro and thermal strain-induced stresses and corrosion-induced stresses. The mechanical strain is employed to calculate macroscopic stresses as [8]:

$$\sigma_{ij} = \sigma_V \delta_{ij} + \frac{3}{2\pi} \int_S \sigma_D \left(n_i n_j - \frac{\delta_j}{3} \right) dS + \frac{3}{2\pi} \int_S \frac{\sigma_{rT}}{2} (n_i \delta_{rj} + n_j \delta_{rj}) dS. \quad (7)$$

in which n_i are components of the unit orientation vector of the microplane, δ_{ij} is Kronecker delta, σ_V and σ_D are volumetric and deviatoric microplane stresses, respectively, and T_r indicates two mutually orthogonal microplane shear stress components σ_M and σ_K . The integration over the surface of the unit radius sphere S is performed numerically (21 integration points, i.e. microplanes). The microplane stress increments are calculated from the in advance defined microplane constitutive laws and from known microplane strain increments, which are obtained from the increment of the mechanical strain tensor ε_{ij}^m by employing kinematic constraint approach. In the above formulation of the microplane model, small strains and small displacements are assumed. For more detail see [8].

To account for the influence of temperature on the macroscopic mechanical properties of concrete, the internal variable of the microplane model are modified

such that the macroscopic response of the model fits temperature-dependent mechanical properties of concrete [4]. However, this influence becomes important only at relatively high temperature and for usual temperatures can be neglected. Moreover, the influence of humidity on mechanical properties is also neglected.

Distribution of temperature, water, oxygen and chloride in concrete is dependent on mechanical properties of concrete. Diffusivity and porosity of concrete are relevant parameters that control transport processes. They are strongly influenced by damage, i.e. for higher level of damage, diffusivity and porosity of concrete are higher. To account for this, transport properties of concrete should be stress- (strain-) dependent. In the literature there are not much data related to diffusion properties of cracked concrete [9] [10, 11]. In theory, after crack opens (critical crack width of 0.1 to 0.2 mm) one should start to treat the crack surfaces as a free surfaces taking into account special boundary conditions on them. However, such approach is too complex and cannot be used for the analysis in engineering practice. Obviously, to solve the problem within the framework of continuum mechanics, simplifications are needed.

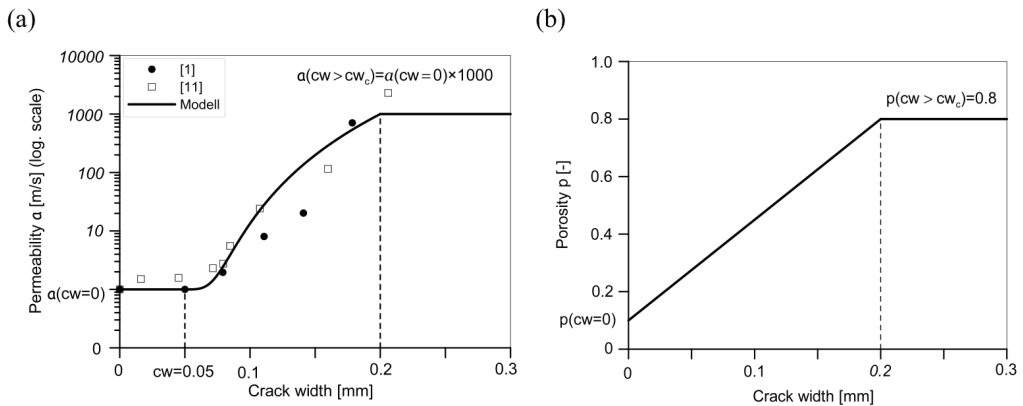


Figure 1. (a) Permeability a (Diffusivity $D_{w,cw}$) as a function of a critical crack width cw_c ($I \geq \alpha_w \geq 0$) and (b) porosity $p_{c,cw}$ as a function of critical crack width

Reviewing partial differential equations that govern transport of heat, water, oxygen and chloride in un-cracked concrete (see (1-4)), it can be seen that the distribution and water content are relevant for the transportation of oxygen and chloride. Therefore, it is reasonable to assume that only transport of water is explicitly influenced by damage. The influence of damage on distribution of temperature, oxygen and chloride will then implicitly be taken into account since their transport takes place through pore water. Having on mind that the processes responsible for the corrosion of reinforcement in crack, before

and after depassivation of steel, are governed by local phenomena, the above assumption is of course rather crude approximation of reality. On the other hand, the problem has to be solved in the framework of continuum mechanics and the governing mechanisms need to be smeared-out and treated as an average solution of the problem. In the first trial it is assumed that only diffusivity coefficient of capillary water D_w and porosity p_c depend on damage (crack width) of concrete. In the present model the crack width cw is calculated using microplane model for concrete [8]. The influence of damage on diffusivity and porosity is taken as shown in Fig. 1. Diffusivity and permeability are related parameters [6], therefore, it is assumed that the influence of damage is the same on both parameters. The shape of the curve which accounts for the influence of the crack width on diffusivity is based on the test results for permeability in cracked concrete [9, 10]. Although the mathematical description of the process is formally of diffusive type (see (1)), the physical meaning of diffusivity coefficient in the crack is not the same as in undamaged concrete.

From Fig. 1a it can be seen that after crack width (cw) reaches a threshold value $\alpha_w cw_c$, diffusivity of concrete increases up to its maximal value that is reached at critical crack width. For further increase of the crack width (open crack), because of numerical and physical reasons, diffusivity in cracked finite element remains constant. Porosity is assumed to increase proportional to the crack width up to its upper limit of 0.8, which corresponds to the critical crack width.

4. Numerical implementation

The numerical analysis is incremental. In each time step Δt partial differential equations, which governs transfer of heat, moisture, oxygen and chloride in concrete and equation of equilibrium (mechanical part of the model) are solved simultaneously using direct integration method of implicit type [12]. When solving non-mechanical part, it is assumed that damage is constant, i.e. non-mechanical properties of concrete are controlled by damage from the end of the previous time (loading) step. The equilibrium equation in each time step is solved iteratively by using Newton-Raphson iterative scheme [12]. Similar as in the solution of the non-mechanical part of the problem, volume fraction of pore water, temperature, oxygen and amount of chloride are assumed to be constant during the equilibrium iteration process.

5. Numerical example

In the numerical example, simply supported reinforced concrete slab of infinite length is exposed to sea water at the bottom side. The thickness of the concrete cover assumed in the analysis is 30 mm. The aim of the study is to demonstrate the influence of concrete damage caused by loading, on distribution of free chloride and on the depassivation time of reinforcement. The analysis is performed by using 3D eight-node solid finite elements assuming plane strain condition. Considered are damaged and

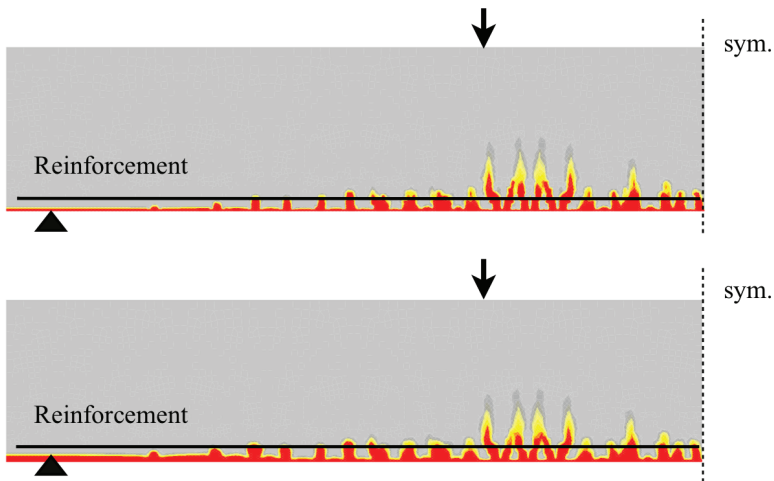


Figure 2. Distribution of the free chloride (red zone = 10 kg/m^3 of pore solution) over the section of the slab after: (a) 10 days and (b) after one year of exposure to sea water

undamaged slabs. Damage is introduced by loading through 4-point bending, which cause yielding of reinforcement and maximal crack width of 0.2 mm at the bottom of the slab. The bottom side of the slab is permanently in contact with sea water.

The distribution of free chloride over the cross-section of the slab after 10 days and after one year is shown in Fig. 2. It is observed that in the cracked concrete chlorides penetrates very fast, almost instantaneous, into the crack direction. Subsequently, chloride penetrates in the region between the cracks (horizontal direction) what cause slight decrease of its concentration in the cracks. The penetration of chlorides in the undamaged part of the slab (bottom left part of the slab) is much slower.

The distribution of the free chlorides over the beam depth, in cracked (over the crack length) and in uncracked part of the beam is shown in Fig. 3. The depassivation of reinforcement is assumed to start for the mass concentration

of free chloride in pore water of 7 kg/m^3 . For unloaded slab depassivation of reinforcement is even after 10 years not reached. For cracked part of the slab depassivation is reached practically after crack is initiated (Fig. 3b) what is in good agreement with experimental observations [11].

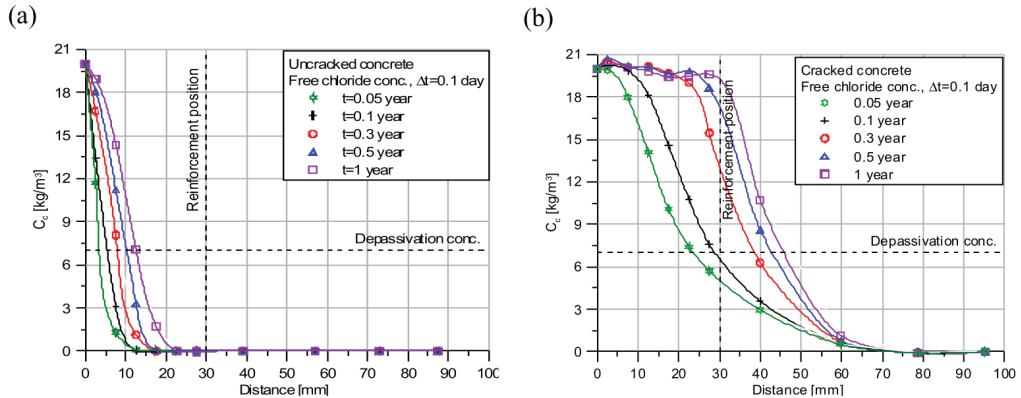


Figure 3. Distribution of the chloride over the slab depth, measured from the bottom of the beam, for: (a) un-cracked part of the RC slab and (b) along the crack length, with max. crack with of the bottom of the slab of 0.2 mm

6. Conclusions

In the present paper the current status of development of the 3D numerical chemo-hydro-thermo-mechanical model for concrete is presented. The final goal is to formulate a model, which is able to realistically simulate corrosion of reinforcement, before and after depassivation of steel, for any boundary conditions and loading. In the present paper mathematical formulation of transport processes before depassivation of steel (strong and weak form) and its implementation into a 3D finite element code are briefly discussed. Furthermore, the coupling between mechanical and non-mechanical parameters of the model is presented. To check the model implementation into a 3D FE code and its capability in prediction of depassivation time of reinforcement, numerical analysis of reinforced concrete slab exposed to sea water is carried out. The numerical results show realistic space and time distribution of state variables that are relevant for depassivation time of reinforcement. It is demonstrated that damage of concrete significantly reduces depassivation time. Moreover, the adopted interaction between mechanical and non-mechanical properties of concrete seems to be realistic since predicted interaction between cracking and depassivation time agrees well with the experience from engineering practice. Further work is needed to verify the model and to simulate the processes after depassivation of reinforcement.

References

- [1] K. Tuutti. *Corrosion of steel in concrete*. Tech. Report, Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, 1993.
- [2] Z.P. Bažant, M.F. Kaplan. *Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models*. Longman, Harlow, 1996.
- [3] D. Gawin, C.E. Majorana, B.A. Schrefler. Numerical analysis of hygro-thermal behavior and damage of concrete at high temperature. *Mechanics of cohesive frictional materials*, **4**: 37-74, 1999.
- [4] J. Ožbolt, I. Kožar, R. Eligehausen, G. Periškić. Three-dimensional FE analysis of headed stud anchors exposed to fire. *Computers and Concrete*, **2**(4): 249-266, 2005.
- [5] B. Martín – Pérez, *Service Life Modelling of RC Highway Structures Exposed to Chlorides*. PhD thesis, University of Toronto, Canada, 1999.
- [6] G. Balabanić, N. Bićanić, A. Đureković. Mathematical modeling of electrochemical steel corrosion in concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, **122**(12): 1113 – 1122, 1996.
- [7] J. Bear, Y. Bachmat. *Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991.
- [8] J. Ožbolt, Y. Li, I. Kožar. Microplane model for concrete with relaxed kinematic constraint. *International Journal of Solid and Structures*, **38**: 2683-2711, 2001.
- [9] C.M. Aldea, M. Ghandehari, S.P. Shah, A. Karr. Estimation of Water Flow through Cracked Concrete under Load. *ACI Materials Journal*, **97**: 567-575, 2000.
- [10] K. Wang, D.C. Jansen, S.P. Shah, A. Karr. Permeability study of cracked concrete. *Cem. and Conc. Res.*, **27**(3): 381-393, 1997.
- [11] F.W. Wittmann, P. Zhang, T. Zhao. Eindringen von Wasser und darin gelöster Verbindungen in Beton: Visualisierung mit Hilfe der Neutronenradiographie. In: Technische Akademie Esslingen, eds., *Erhaltung von Bauwerken*, 1. Colloquium, 249-253. M. Raupach, Ostfildern: TAE, 2009.
- [12] T. Belytschko, W.K. Liu, M. Moran. *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*. John Wiley & Sons Ltd., 2001.

Numerička analiza prodora klorida u armiranobetonski stup sa vremenski ovisnim rubnim uvjetima

Numerical analysis of chloride ingress in reinforced concrete column with time dependent boundary conditions

Neira Torić, Gojko Balabanić, Ivica Kožar

Sažetak. U ovom radu primijenjen je 2-D matematički model difuzije za predviđanje prodora klorida u armiranobetonski stup. Poseban naglasak je ovdje stavljen na rubne uvjete, koji su promjenljivi u vremenu. Budući da je donos klorida u zoni zapljuskivanja konstrukcija u priobalnom području stohastički proces, vrlo je teško odrediti funkciju promjene koncentracije klorida na površini u vremenu. Rješenje jednadžbi koje opisuju mehanizam prodora klorida u beton zahtijeva definiranje uvjeta koji egzistiraju na rubu. Međutim, jedan od problema sa kojima se suočavamo kod modeliranja uporabnog vijeka konstrukcija povezanog sa korozijom armature induciranom kloridima, je nedostatak informacija o tome kako se utjecaj različitih tipova uvjeta izloženosti ispoljava na različite betonske konstrukcije. Općeniti pristup kod modeliranja procesa difuzije se zasnivao na određivanju približne koncentracije klorida na površini armature. Preuzet je izraz iz literature koji opisuje promjenu rubnih uvjeta u vremenu, prema kojem je koncentracija klorida na rubu funkcija drugog korijena starosti betona. Na primjeru stupova Krčkog mosta kao najviše izloženih konstruktivnih elemenata mosta, prognozirano je, vrijeme do aktivacije procesa korozije, s obzirom na djelovanje klorida u zoni zapljuskivanja iznad razine mora i u zoni atmosferskog utjecaja.

Ključne riječi: korozija, prodor klorida, difuzija, Krčki most, 2D analiza

Abstract. In this paper 2-dimensional mathematical model of diffusion process for predicting chloride ingress through the reinforced concrete column is implemented. Special emphasis is put on time-dependent boundary conditions. Since chloride ingress through the offshore structures in marine environment is stochastic process, it is very difficult to define a function for describing change of the surface chloride concentration in time. Solution of chloride ingress equation requires definition of the conditions existing on a boundary. One of the problems that arise when dealing with modelling lifetime of a reinforced concrete structures affected by corrosion, which is induced with chlorides, is how different types of exposure conditions reflect on various types of concrete structures. General approach when modelling diffusion process is to estimate an approximate chloride concentration on the steel surface. Expression describing change of the boundary conditions with time is adopted from the literature. According to this relation, surface chloride concentration is a square root function of concrete age. Time period, necessary to reach critical chloride concentration on the reinforcement, for reinforced concrete column of the Krk bridge, is obtained. Thereby the atmospheric zone and the splashing zone as exposure conditions were observed.

Key words: corrosion, chloride ingress, diffusion, Krk bridge, 2D numerical analysis

1. Uvod

Korozija armature inicirana prisustvom klorida predstavlja jedan od glavnih uzroka oštećenja armiranobetonskih konstrukcija u morskom okolišu. Zbog bubrenja korozivskih produkata nakupljenih oko armature, oštećenja se pojavljuju u obliku pukotine ili odvajanja zaštitnog sloja betona, što pogoduje prodoru agresivnih tvari u konstrukciju, te rezultira njenim progresivnim oštećenjem. Zbog smanjenja površine poprečnog presjeka armature i slabljenja veze između betona i armature, smanjuje se prema tome i nosivost konstrukcije.

Armatura je u “zdravom” PC betonu (pH 12.5 – 13) zaštićena filmom oksidiranog željeza. Taj sloj oksidiranog željeza se počinje mijenjati ako alkalitet porne otopine bude snižen ispod $\text{pH} \approx 11.5$. Jedan od razloga depasiviranja čelika je prisustvo dovoljne količine klorida otopljenih u pornoj tekućini u blizini armature. Postoje razni kriteriji [3][6][8] za kritičnu količinu klorida, međutim ona se najčešće definira njihovom ukupnom količinom.

Ukoliko pretpostavimo da je beton potpuno zasićen vodom, tada se prodor klorida može opisati jednadžbom difuzije. Zbog prodiranja klorida iz više pravaca, 1-D model nije prikladan za predviđanje prodora klorida do armature u kutnoj zoni konstrukcijskog elementa, stoga je u ovom radu primijenjen 2-D matematički model difuzije za predviđanje prodora klorida u armiranobetonski stup.

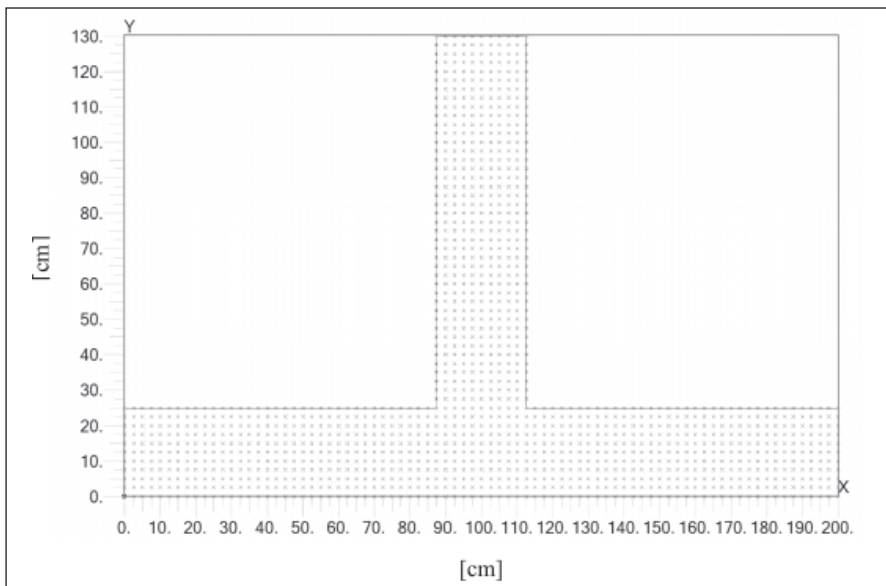
Cilj ovog rada je, za rubne uvjete promjenljive u vremenu, pomoću 2-D numeričkog modela prodora klorida u betonsku konstrukciju, predvidjeti vrijeme dostizanja kritične koncentracije klorida uz armaturu.

2. Matematički model prodora klorida kroz beton

Zbog pretpostavke da je beton potpuno zasićen vodom, doprinos gibanju klorida zbog gibanja porne tekućine uzrokovanog gradijentom vlažnosti je izuzet iz proračuna, pa se prodor klorida u beton može opisati slijedećom parcijalnom diferencijalnom jednačbom [1]:

$$\frac{\partial C_c}{\partial t} = D_c \left(\frac{\partial^2 C_c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_c}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

C_c je koncentracija klorida, a D_c je koeficijent difuzije klorida kroz beton. Prostorna domena promatranja prodora klorida je poprečni presjek stupa Krčkog mosta (I – presjek sa otvorima na hrptu). Zbog simetrije poprečnog presjeka stupa, analizirana je samo polovica stupa u obliku T – presjeka. Mreža čvorova je prikazana na *Slici 1*.



Slika 1. Prikaz diskretizirane domene

Prostornu diskretizaciju čini ekvidistantna mreža čvorova veličine inkrementa $\Delta x = \Delta y = 2,5$ cm. Domena promatranja je predstavljena mrežom od ukupno

1353 čvora. U svakom čvoru mora biti zadovoljena diferencijalna jednadžba koja opisuje proces difuzije klorida. (1) je transformirana primjenom metode konačnih razlika i ispisana za svaki čvor u domeni. Time je diferencijalna jednadžba koja opisuje prodor klorida razložena na sustav od 1353 linearne jednadžbe. Za kutnu zonu presjeka u kojoj se nalazi armatura načinjena je posebna diskretizacija sa gušćom mrežom čvorova na udaljenosti $\Delta x = \Delta y = 1$ cm, jer je za zaštitni sloj betona uzeta debljina od 3 cm.

Cilj rada je prognozirati vrijeme koje je potrebno da kloridi, koji s vanjskih ploština stupa prolaze kroz beton do armaturnog čelika, dostignu koncentraciju jednaku kritičnoj. U tom trenutku dolazi do inicijacije procesa korozije na čeliku, a nakon nekog vremena i do pucanja betona, odnosno zaštitnog sloja. Čelik ostaje nezaštićen, pri čemu je izložen progresivnom propadanju i gubitku prvobitne funkcije.

Koristeći centralnu metodu konačnih razlika (1) transformira se u:

$$D_c \left[\frac{C_{ci+l,j} - 2C_{ci,j} + C_{ci-l,j}}{\Delta x^2} + \frac{C_{ci,j+l} - 2C_{ci,j} + C_{ci,j-l}}{\Delta y^2} \right] = \frac{\partial C_c}{\partial t} \quad (2)$$

Uz uvjet da je $\Delta x = \Delta y$, dio (2) koji opisuje prostorne promjene izgleda:

$$\frac{D_c}{\Delta x^2} [C_{ci+l,j} - 2C_{ci,j} + C_{ci-l,j} + C_{ci,j+l} - 2C_{ci,j} + C_{ci,j-l}] \quad (3)$$

Metoda konačnih razlika (MKR) može se primijeniti na vremenski ovisne procese tako da je diskretizacija u vremenu predstavljena nizom od "n" vremenskih koraka $t^0 = 0, \Delta t, 2 \cdot \Delta t \dots t^n = n \cdot \Delta t = T$, gdje je t^0 početni, a t^n posljednji vremenski korak. U svrhu jednostavnosti modela pretpostavljaju se konstantni vremenski i prostorni intervali. Diskretno rješenje u točki se označava kao $C_i^n \approx C(x_p, y_p, t^n)$.

Aproksimacija prve jednadžbe prema natrag u vremenu [7]:

$$C_i(x, y, t^n) \approx \frac{C(x, y, t^n) - C(x, y, t^{n-1})}{\Delta t} \quad (4)$$

Za vremensku diskretizaciju usvojen je vremenski inkrement uvjetovan prirodom samog procesa, odnosno koeficijentom difuzije i gustoćom mreže. Kako je proces korozije izrazito spor proces, prednost je uzeti veliki vremenski korak kod provođenja iterativnog postupka rješavanja. Primijenjena je implicitna metoda poznata i kao backward Euler metoda za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi u vremenskoj domeni. Implicitna metoda je bezuvjetno stabilna, no radi veće točnosti rješenja vodilo se računa da je zadovoljen uvjet [4]:

$$\Delta t < \frac{\Delta x^2}{4D_c} \quad (5)$$

Takvim smanjivanjem vremenskog koraka osigurava se smanjenje greške u odnosu na točno rješenje [2]. Odabrani vremenski inkrement je $\Delta t = 10$ dana, pri čemu je ukupni vremenski period promatranja $T = 12300$ dana.

3. Prikaz sustava jednadžbi u matričnom obliku

Jednadžbe nastale aproksimacijom diferencijalne jednadžbe konačnim razlikama mogu se formalizirati matričnim zapisom, kao i postupak rješavanja tako dobivenih jednadžbi. Ako kažemo da matrica $[A]$ sadrži koeficijente prema metodi konačnih razlika i

$$D_c[A] = [K] \quad (6)$$

gdje su

$[A]$ - matrična forma konačnih razlika

$[K]$ - matrica difuzivnosti [5]

tada (1) i (2) izgledaju:

$$[K] \cdot \{C_c\} = \{H\} + \frac{\partial \{C_c\}}{\partial t} \quad (7)$$

gdje su

$\{C_c\}$ - vektor rješenja – vrijednosti koncentracije klorida u prostoru i vremenu

$\{H\}$ - rubni uvjeti – vektor rubnih vrijednosti koncentracije klorida

Zamijenimo li izraz za promjenu koncentracije klorida po vremenu aproksimacijom konačnim razlikama prema natrag u vremenu t^n dobije se matrična jednadžba za n -tu iteraciju u vremenu:

$$[K] \cdot \{C_c\}_n = \{H\}_n + \frac{\{C_c\}_n - \{C_c\}_{n-1}}{\Delta t} \quad (8)$$

Vektor $\{H\}_n$ sadrži podatke o rubnim uvjetima čije se vrijednosti mijenjaju za sve vremenske korake, od $t_0, t_1 \dots t_n$ prema izrazu:

$$\{H\}_n = S \cdot m_b \cdot \sqrt{t} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (9)$$

gdje je $S \left[\frac{I}{\sqrt{s}} \right]$ koeficijent površinske koncentracije klorida, a $m_b \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ je volumenska masa betona. Koeficijent S je dobiven empirijski i poprima vrijednosti od $1.56 - 5.57 \cdot 10^{-6} \frac{I}{\sqrt{s}}$ u zoni atmosferskog utjecaja i od $5.31 - 16.6 \cdot 10^{-6} \frac{I}{\sqrt{s}}$ u zoni zapljuskivanja [6]. Ako uvedemo izraz za trenutnu matricu difuzivnosti:

$$[K] - \frac{I}{\Delta t} [I] = [K_t] \quad (10)$$

i izraz za vektor početnih i rubnih uvjeta:

$$\{B\} = \{H\} - \frac{1}{\Delta t} [I] \cdot \{C_c\}_n, \quad (11)$$

dobivamo rješenje nestacionarnog problema koncentracije klorida u obliku:

$$\{C_c\} = [K_t]^{-1} \cdot \{B\} \quad (12)$$

Rubni uvjeti su sadržani u vektoru $\{H\}$, a početni uvjeti se moraju uzeti u obzir u prvoj iteraciji koja glasi:

$$\{C_c\} = [K_t]^1 \cdot \{B_0\} \quad (13)$$

gdje je

$$\{B_0\} = \{H\} - \frac{I}{\Delta t} [I] \cdot \{H_0\} \quad (14)$$

pri čemu je

$\{H_0\}$ - vektor početnih vrijednosti koncentracije klorida.

4. Početni i rubni uvjeti

Kao početni uvjet za proračun pretpostavljeno je da je koncentracija klorida u betonu jednaka nuli. Na vanjskim plohama je zadan Dirichletov rubni uvjet koji se mijenja u vremenu, a promjena je opisana izrazom:

$$C_r = S \cdot \sqrt{t} \quad [kg/m^3] \quad (15)$$

gdje je S koeficijent površinske koncentracije klorida, koji ovisi o tipu konstrukcije i zoni izlaganja. Vrijednosti koeficijenta S su procijenjene iz izmjerenih podataka za konstrukcije u obalnom području. Dobiveni su rasponi vrijednosti za zonu zapljuskivanja $S_s = 1,56-4,88 \cdot 10^{-3}$ (dan)^{1/2} i zračnu zonu $S_a = 0,46-1,64 \cdot 10^{-3}$ (dan)^{1/2} [6]. Vanjske plohe stupa označene su prema orijentaciji kao strana Rijeka, strana Crikvenica, strana Sv. Marko i strana kopno (otok Krk).

Ulazni parametri potrebni za proračun:

Prostorni inkrement: $\Delta x = \Delta y = 0.01$ m

Vremenski inkrement: $\Delta t = 10$ dana

Volumenska masa betona: $\rho_{bet} = 2500$ kg/m³

Masa cementa / m³ betona: $m_{cem} = 450$ kg/m³ [10]

Koeficijent difuzije klorida: $D_c = 0.43 \cdot 10^{-6}$ m²/dan

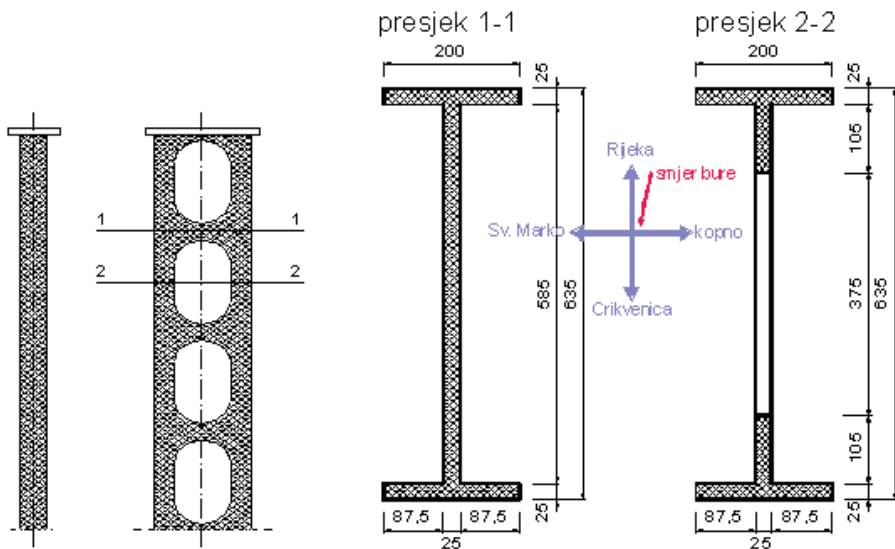
Koef. površinske konc. klorida: $S_a = 1.64 \cdot 10^{-3} \cdot 1 / \sqrt{\text{dan}}$

$S_s = 4.88 \cdot 10^{-3} \cdot 1 / \sqrt{\text{dan}}$

Prema [7] krit. koncentracija: $C_{krit} = 0.004 m_{cem} = 0.004 \cdot 450 = 1.8$ kg/m³

5. Opći podaci o stupovima Krčkog mosta

Geometrija i dimenzije stupa prikazani su na *Slici 2.*:

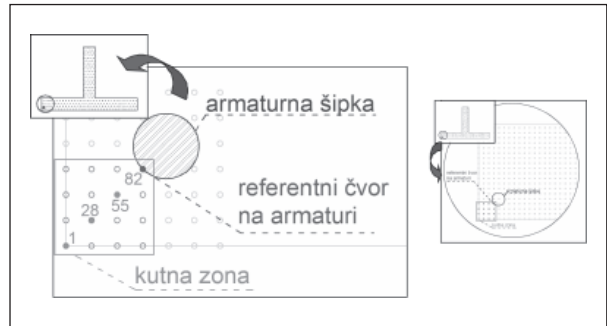


Slika 2. Prikaz pogleda i poprečnog presjeka stupa Krčkog mosta

6. Rezultati proračuna

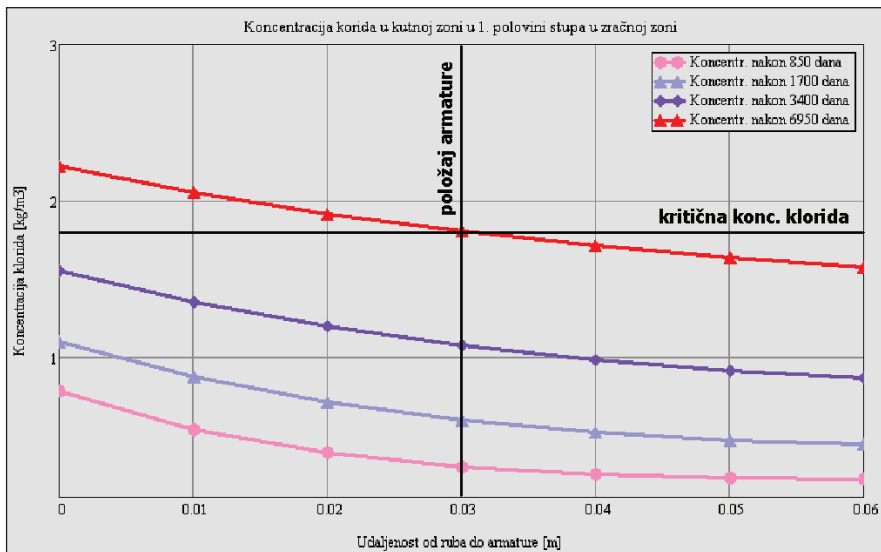
Čvorovi u kutnoj zoni i položaj armature prikazani su na *Slici 3*.

Čvorovi 1, 28, 55 i 82 na *Slici 3* predstavljaju čvorove jednako udaljene od dva okomita ruba. Na *Slikama 4. i 5.* prikazani su dijagrami raspodjele koncentracije klorida u čvorovima koji se nalaze na dijagonali kutne zone (zona gdje se spajaju zaštitni slojevi betona u dva okomita smjera) u za različite uvjete izloženosti. Dijagrami prikazuju raspodjelu koncentracije klorida u zaštitnom sloju betona debljine 3 cm, za polovinu simetričnog stupa s rubnim uvjetima karakterističnim za zonu atmosferskog utjecaja i zonu zapljuskivanja mora.

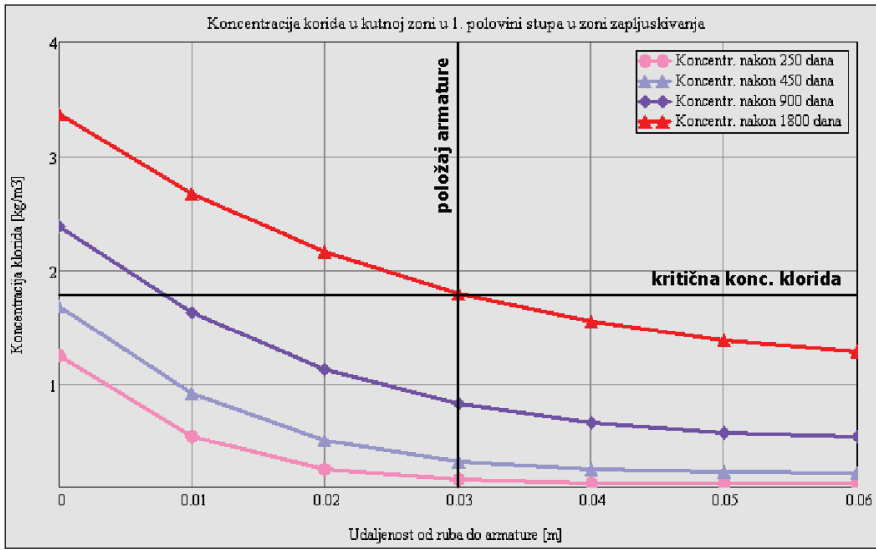


Slika 3. Prikaz presjeka i čvorova u kutnoj zoni za koje je dana koncentracija u dijagramima

Ukupni period promatranja od 6950 dana u zračnoj zoni, te 1800 dana u zoni zapljuskivanja, je vrijeme potrebno da koncentracija klorida uz armaturu dostigne kritičnu vrijednost od 1,8 kilograma na 1 m³ betona, uz zadane rubne uvjete, koji su promjenjivi u vremenu.

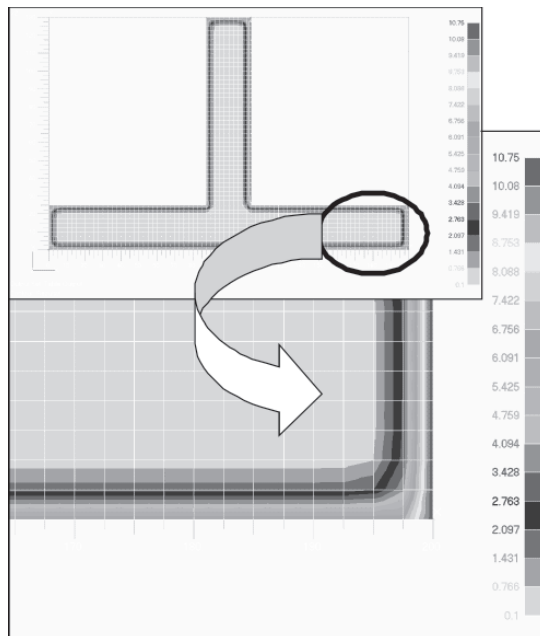


Slika 4. Prikaz promjene koncentracije klorida u kutnoj zoni poprečnog presjeka i zoni atmosferskog utjecaja



Slika 5. Prikaz promjene koncentracije klorida u kutnoj zoni poprečnog presjeka i zoni zapljuskivanja mora

Na Slici 6. dan je grafički prikaz raspodjele klorida u betonskim presjecima stupa pomoću izolinija.



Slika 6. Uvećani prikaz raspodjele klorida u kutnoj zoni poprečnog presjeka stupa nakon 1800 dana

7. Zaključak

Djelovanje korozije na betonske konstrukcije može se promatrati kroz dvije faze: vrijeme do početka procesa korozije i vrijeme u kojem se proces kontinuirano odvija većom ili manjom brzinom, ovisno o vanjskim uvjetima. Prvi period traje znatno dulje od drugog i ima ključnu ulogu u zaštiti konstrukcija, budući da se preventivnim mjerama može produljiti. Time se može odgoditi početak procesa korozije. Stoga je upravo vremenski period do početka korozije zanimljiv za proučavanje i modeliranje [9].

Na primjeru stupova Krčkog mosta kao najviše izloženih konstruktivnih elemenata mosta, prognozirano je vrijeme depasiviranja čelika s obzirom na djelovanje klorida u zoni atmosferskog utjecaja i u zoni zapljuskivanja iznad razine mora. Taj period, s obzirom na navedene uvjete izloženosti i primijenjeni zakon promjene rubnih uvjeta u vremenu, prema ovim proračunima iznosi približno 19 godina u zoni atmosferskog utjecaja, odnosno 5 godina u zoni zapljuskivanja.

Literatura

- [1] Balabanić, G.: *Numeričko modeliranje procesa korozije čelika armiranobetonskih konstrukcija u moru*, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1993.
- [2] Bathe, K. J.: *Finite element procedures*, Prentice Hall, New Jersey 1996.
- [3] Browne, R.: *Design prediction of the life for reinforced concrete in marine and other chlorine environments*, Durability of building materials, 1(2), 113-125.
- [4] Kreyszig, E.: *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [5] Lozzi-Kožar, D.: *Nelinearni proračun betonskih konstrukcija uslijed toplinskog opterećenja*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2006.
- [6] Perez., B. M.: *Service life modelling of RC highway structures exposed to chlorides*, University of Toronto, National Library of Canada, 1999.
- [7] Piero, J., Sherwin, S.: *Handbook of Materials and Modeling*, Volume I: Methods and Models, 1-32., Department of Aeronautics, Imperial College, London, UK, Springer, Printed in Netherlands, 2005.
- [8] Swatakititham S.: *Computational Model for Chloride Concentration at Surface of Concrete Under Actual Environmental Condition*, doktorska disertacija, Kochi University of Technology, Kochi, Japan, 2004.
- [9] Val D. V., Trapper P. A.: *Probabilistic evaluation of initiation time of chloride-induced*
- [10] Međunarodni simpozij: *Dostignuća u građevinarstvu primjenom aditiva*, Biro za ekonomsku propagandu – Kemijski kombinat Chromos – OOUR Kutrlin, Split, 1979.



ISSN 0350-8552

9 770350 855209