

ANALIZA PROTOČNOSTI KANALA RAZLIČITIH OBLIKA POPREČNIH PRESJEKA I OBLOŽENOSTI

HYDRAULIC ANALYSIS OF DIFFERENT CROSS SECTIONS AND CHANNEL COVERING TYPES

Ines Kolar*, Goran Volf*, Elvis Žic*

Sažetak

U ovome radu prikazane su hidrauličke analize protočnosti pod utjecajem različitih oblika poprečnih presjeka i vrste obloženosti kanala. Prilikom analize različitih oblika poprečnih presjeka izrađen je hidraulički proračun za jednoliko stacionarno tečenje za trokutni, pravokutni, trapezni i polukružni oblik poprečnog presjeka kanala. Prvom provedenom hidrauličkom analizom uspostavilo se da je, u pogledu protočnosti kanala, najpovoljniji polukružni oblik poprečnog presjeka kanala. U drugoj hidrauličkoj analizi promatrane su različite vrste obloženosti stijenki kanala te se u tu svrhu također proveo hidraulički proračun za jednoliko stacionarno tečenje u kojem su promatrane različite obloge kanala, odnosno koeficijenta hrapavosti na protočnost. Provedena analiza pokazala je kako veći koeficijenti hrapavosti daju manju protočnost u kanalu i obrnuto. Samim time, prilikom dimenzioniranja kanala, odnosno hidrauličkog proračuna, potrebno je uzeti u obzir odgovarajući poprečni presjek kanala te vrstu obloženosti kanala kako bi dimenzionirani kanal bio najpovoljniji u pogledu što manjih hidrauličkih gubitaka i što veće propusne moći.

Ključne riječi: kanali, koeficijent hrapavosti, hidraulička analiza, hrapavost kanala, poprečni presjek kanala, protočnost kanala

Abstract

This paper presents hydraulic analysis of flow in channels under the influence of various cross-sections and type of covering of the channel. During the analysis of different cross sections, a hydraulic design was made for uniform stationary flow for the triangular, rectangular, trapezoidal and semicircular cross-sectional shape of the channel. First performed hydraulic analysis established that the semicircular cross-section of the channel is the most favorable in terms of flow. In the second hydraulic analysis, various types of covering of the channel were observed and a hydraulic

* Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: ines.kolar@student.uniri.hr, goran.volf.elvis.zic@uniri.hr

design for uniform stationary flow was carried out in order to observe different channel coverings, i.e. the coefficient of roughness. The analysis showed that higher coefficients of roughness give a smaller flow in the channel and smaller coefficients of roughness give a higher flow in the channel. In this case, when dimensioning the channel or the hydraulic design, the appropriate cross section of the channel and the type of covering of the channel should be taken into consideration so that the dimensioned channel is most favorable in terms of smaller hydraulic losses and greater flow in the channel.

Key words: *channels, coefficient of roughness, hydraulic analysis, roughness of channel, channel cross-section, flowability of channels*

1. Uvod

Tečenje u otvorenim koritima je tečenje sa slobodnim vodnim licem ili površinom na kojoj vlada atmosferski tlak p_a , a koje nastaje pod utjecajem nagiba terena i sile teže pa je na slobodnoj vodnoj površini piezometarska razina jednaka geodetskoj koti [1]. Također se usvaja da je voda nestišljiva i homogena, pri čemu se dakle isključuju brza strujanja u kojima zrak ulazi u vodu [1].

U inženjerskoj praksi se tečenje u otvorenim koritima promatra s obzirom na promjenu oblika vodnog lica i promjenu parametara toka (npr. brzine i dubine) u vremenu. S obzirom na oblik vodnog lica, tečenje u otvorenim koritima se dijeli na jednoliko i nejednoliko. S obzirom na promjenu parametara u vremenu, razlikuju se stacionarna i nestacionarna tečenja s postepenim promjenama te nestacionarna tečenja s naglim promjenama [1, 2].

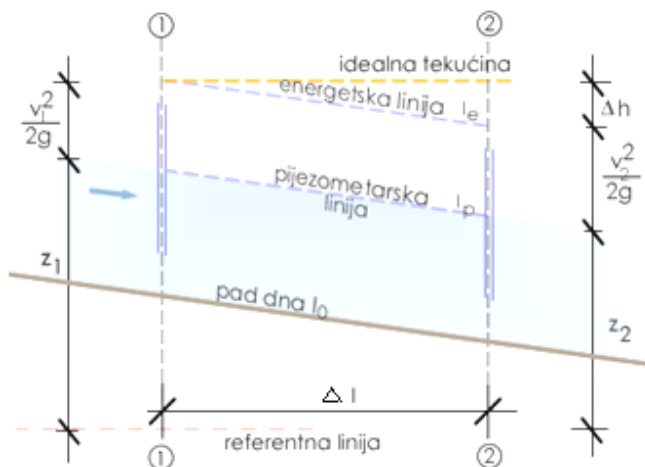
Stacionarno strujanje znači da se brzina i tlak u bilo kojoj točki poprečnog presjeka ne mijenjaju tijekom vremena, dok se pak kod nestacionarnog mijenjaju. Stacionarno strujanje se dalje dijeli na jednoliko i nejednoliko. Jednoliko strujanje ostvarivo je u koritima s konstantnom brzinom, oblikom i površinom poprečnog presjeka te padom kanala i koeficijentom hrapavosti uzduž trase (tzv. prizmatična korita). Takvo tečenje ostvarivo je samo u umjetno sagrađenim kanalima. Kod nejednolikog tečenja svi ovi parametri uzduž toka su promjenjivi [1, 3].

U ovome radu prikazat će se hidrauličke analize protočnosti pod utjecajem različitih oblika poprečnih presjeka i vrste obloženosti stijenki kanala za jednoliko stacionarno tečenje.

2. Jednoliko stacionarno strujanje

Za jednoliko stacionarno strujanje (Slika 1) potrebno je ispuniti sljedeće uvjete [1, 4]:

- stalni protok u koritu ($Q=\text{const.}$)
- stalna protjecajna površina korita (prizmatična korita), ($A=\text{const.}$)
- stalni hidraulički pad ($I=\text{const.}$)
- stalna hrapavost stijenke korita uzduž toka ($n=\text{const.}$)
- pravocrtno strujanje, tj. strujanje bez lokalnih otpora.



Slika 1. Jednoliko stacionarno strujanje u kanalu [5]

Ovi uvjeti postoje u umjetno izvedenim kanalima. Korita s nepromjenjivim oblikom poprečnog presjeka, tj. korita kojima je poprečni profil uzduž toka stalan nazivaju se prizmatična korita. Također, postoje i korita sa zaobljenom stijenkom (kao polukružni/kružni profili u kanalizaciji) kojima je također poprečni profil uzduž toka stalan.

Uz stalnost površine i protoka očekuje se i nepromijenjen profil brzine uzduž toka. Usvaja se srednja brzina po presjeku te da su strujnice kvaziparalelne i da je raspored tlakova po vertikali hidrostatski. Dakle jednoliko strujanje može biti samo stacionarno (ustaljeno) i nastati u prizmatičnim koritima. Dubina vode (h) je konstantna uslijed čega je pad vodnog lica I_p jednak padu dna kanala I_0 , a zbog jednake brzinske visine u svim presjecima jednak je i padu linije energije I_e : $I_0 = I_p = I_e$ (Slika 1) [1, 6].

Dubina vode koja se javlja pri jednolikom strujanju za zadani pad dna I_0 , i protok Q naziva se normalna dubina i označava se h_0 [m]. Pad dna kod kojeg je normalna dubina jednaka kritičnoj dubini zove se kritični pad – I_{cr} . Ako je pad dna $I < I_{cr}$, onda je normalna dubina veća od kritične dubine i tok je

miran. Ukoliko je obrnuto $I > I_{cr}$, normalna dubina vodotoka je manja od kritične dubine i tok je silovit [1, 2].

Ukoliko kanal ima prethodno nabrojana svojstva, njegova srednja brzina u profilu iznosi:

$$\bar{v} = \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{c_f}} \sqrt{RI_0} \quad (1)$$

gdje je:

\bar{v} - srednja brzina u profilu (m/s)

c_f - koeficijent otpora trenja (/)

R - hidraulički radijus (m)

I_0 - pad dna kanala (/)

Iz prethodnog izraza (1) dobiva se Chezyjeva formula za brzinu strujanja u kanalima:

$$C = \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{c_f}} \text{ ili} \quad (2)$$

$$v = C \sqrt{RI_0} \quad (3)$$

Koeficijent C iz prethodnog izraza (2) predstavlja Chezyjev broj. Chezy je francuski inženjer koji je na temelju svojih mjerenja brzine strujanja vode otkrio formulu. Tvrdio je da svakom koritu odgovara njegova konstanta C . Kasnije je dokazano da C zapravo nije konstanta, već broj određen lokalnim koeficijentom otpora trenja c_f u graničnom sloju te iz toga slijedi podjela na [1]:

- laminarno strujanje
- prijelazno strujanje
- turbulentno strujanje, koje se opet dijeli na:
 - turbulentno hrapavo
 - turbulentno glatko
 - turbulentno prijelazno strujanje.

Kako je razvoj graničnog sloja u koritima ovisan ne samo o Reynoldsovom broju Re i o apsolutnoj hrapavosti e , već i o obliku poprečnog presjeka A , postaje jasno da se ne može pronaći neka jednostavna zakonitost koja bi vrijedila općenito za sve oblike korita [1].

Od svih formula najčešće je u primjeni Manningova formula za brzinu u koritu:

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I_e^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

gdje je:

n - Manningov koeficijent hrapavosti (s/m^{1/3}),
 R - hidraulički radijus (m),
 I_e - nagib linije energije (/).

Chezyjev broj koji odgovara Manningovoj formuli (4) glasi:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \quad (5)$$

Kod jednolikog strujanja u kanalima pretpostavlja se izostanak lokalnih otpora:

$$\Delta h = h_{tr} = I_e \Delta l = c_f \frac{\Delta l}{R} \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

odakle slijedi:

$$\frac{\Delta h}{\Delta l} = \frac{c_f}{2g} \frac{v^2}{2g} = I_e \quad (7)$$

Za jednostavne poprečne presjeka kanala za koeficijent otpora trenja c_f se u Chezyjevom broju može koristiti ekvivalentni koeficijent tečenja za cijevi $\lambda = 4c_f$, koji se određuje za ekvivalentni promjer $D = 4R$ (jednakost hidrauličkog radijusa R) i relativnu hrapavost $e/4R$. Tada se dobije formula za brzinu u kanalu u obliku [1]:

$$v = \frac{\sqrt{8g}}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{R I_e} \quad (8)$$

2.1. Koeficijent hrapavosti korita

Za razliku od izgrađenih kanala, prirodna riječna korita (nizinske i brdske rijeke, potoci) imaju nepravilne oblike poprečnih presjeka, promjene nagiba dna te vijugavosti osi trase. Kod prirodnih korita se uzdužni profil vodene površine neprestano mijenja. Česte su promjene hidrauličkih parametara uzduž toka rijeke, prisutnost plićaka i hidrodinamičke sile koji svojim djelovanjem djeluju na promjene po duljini i dubini toka [2, 7].

Tipične vrijednosti Manningovog koeficijenta hrapavosti n dane su u Tablici 1. Preciznije vrijednosti koeficijenta n se često različito objašnjavaju. Osim za umjetno izrađene površine kanala, slične onima pronađenim u novim kanalima ili cijevima, struktura površinskog kanala može biti veoma složena i promjenjiva [7]. Te su različite metode upotrebljene za dobivanje značajnijih procjena vrijednosti koeficijenta n za dane situacije. Valja napomenuti da je greška u mjerenju protoka Q direktno proporcionalna sa greškom Manningova koeficijenta hrapavosti n [7].

Tablica 1. Manningov i Stricklerov koeficijent hrapavosti za pojedine vrste obloženosti korita/kanala [1]

| Kat. | Vrste obloge | n (s/m^{1/3}) | K=1/n (m^{1/3}/s) |
|-------------|--|----------------------------------|--------------------------------------|
| I | <i>Osobito glatke površine; emajlirane ili glazirane površine</i> | 0,009 | 111 |
| II | <i>Vrlo brižno oblanjane daske i dobro sastavljene; najbolja čista cementna žbuka (zaglađena)</i> | 0,010 | 100 |
| III | <i>Najbolja cementna žbuka (1/3 pijeska); čiste nove grnčarske cijevi; cijevi od lijevana željeza; dobro sastavljene željezne cijevi; dobro oblanjane daske</i> | 0,011 | 90,9 |
| IV | <i>Neoblanjane daske, dobro sastavljene; vodovodne cijevi u normalnim okolnostima, bez veće inkrustacije; vrlo čiste cijevi za otpadnu vodu i vrlo dobar beton.</i> | 0,012 | 83,3 |
| V | <i>Drvena obloga dobro obrađena; dobra obloga od opeke; cijevi za otpadnu vodu u normalnim okolnostima; ponešto nečiste cijevi za vodu.</i> | 0,013 | 76,9 |
| VI | <i>Zaprljane cijevi (vodovodne i za otpadnu vodu); betonirani kanali u srednjim okolnostima</i> | 0,014 | 71,4 |
| VII | <i>Srednje dobra obloga od opeke; tarac od klesana kamena u srednjim okolnostima; dovoljno zaprljane cijevi za odvod otpadne vode; cerada na drvenim letvama</i> | 0,015 | 66,7 |
| VIII | <i>Dobar tarac od lomljena kamena; stara (oštećena) obloga od opeke; relativno grub teren</i> | 0,017 | 58,8 |
| IX | <i>Kanal pokriven debelim stabilnim slojem mulja, kanali u zbijenom sitnom šljunku, pokriveni neprekidnim tankim slojem mulja (pri tome sve u besprijekornom stanju)</i> | 0,018 | 55,6 |
| X | <i>Srednje dobar tarac od lomljena kamena; tarac od oblutaka; kanali usječeni u kamenu; kanali u lesu, prekriveni tankim slojem mulja (u običnom stanju)</i> | 0,02 | 50,0 |
| XI | <i>Kanali u zbijenoj glini; kanali u lesu, šljunku i zemlji, pokriveni isprekidano tankim slojem mulja; veliki zemljani kanali u dobrom stanju</i> | 0,0225 | 44,4 |
| XII | <i>Dobra suha obloga, veliki zemljani kanali srednje održavani i mali zemljani kanali dobro održavani; rijeke u veoma dobrim okolnostima (čisto, pravolinijsko korito sa slobodnim tokom, bez obalnih urušavanja u dubokih vododerina)</i> | 0,025 | 40,0 |
| XIII | <i>Veliki zemljani kanali u nešto slabijem stanju i mali kanali u dobrom stanju.</i> | 0,0275 | 36,4 |
| XIV | <i>Zemljani kanali u slabom stanju, npr. sa šašem, oblutcima ili šljunkom na dnu, poprilično zarasli</i> | 0,03 | 33,3 |

| | | | |
|------------|---|----------------------------|-----------------------------|
| | <i>travom, s odronjavanjem obalnih kosina i sl.; rijeke u dobrim okolnostima tečenja</i> | | |
| XV | <i>Kanali u vrlo lošim okolnostima (s nepravilnim profilima, poprilično zatrpani kamenom i s vodenom travom); rijeke u relativno dobrom stanju, ali s nekom količinom kamena i šaši</i> | <i>0,035</i> | <i>28,6</i> |
| XVI | <i>Kanali u vrlo lošem stanju (sa znatnim vododerinama i odronjavanjima obala, zarasli šašem, s krupnim kamenjem na dnu i sl.); rijeke s pogoršanim okolnostima tečenja (u usporedbi s prethodnom t.), s povećanom količinom kamena i šaši, s vijugavim koritom</i> | <i>0,04 i više</i> | <i>25,0 i manje</i> |

3. Rezultati i diskusija

Hidraulički proračun za pojedini poprečni profil kanala proveden je za jednoliko stacionarno tečenje. Za proračun je korištena Manningova formula prema izrazu (4). Manningova formula je dovoljno točna aproksimacija turbulentnog hrapavog strujanja, tako da je dosta dugo bila u upotrebi i za proračune strujanja u cijevima, naročito u velikim tunnelskim cjevovodima. Jednostavnost, i prije svega obilje podataka o hrapavosti prirodnih i umjetnih korita, te dovoljna točnost za inženjerske proračune, čine Manningovu formulu osnovnom za proračune brzine u koritima različitih oblika poprečnog presjeka [1].

3.1. Proračun kanala sa različitim koeficijentima hrapavosti obloge

Protok u kanalu uvelike ovisi o hrapavosti obloge kanala (pokosa i dna kanala), tj. o materijalu kojim je kanal obložen te kakvoći izvedbe i obraslosti prirodno izvedenih korita.

Korištenjem Manningove formule proveden je hidraulički proračun za određivanje protoka u kanalu trapeznog, pravokutnog, polukružnog te trokutnog poprečnog presjeka (Slika 2). Prilikom hidrauličkog proračuna korištena je ista vrijednost površine živog presjeka kanala (3,24 m²) te pada dna kanala (0,5 %), dok se koeficijent hrapavosti (obloga stijenci kanala) mijenjao ovisno o samoj oblozi kanala. Za proračun su korišteni koeficijenti hrapavosti prikazani u Tablici 1. Rezultati hidrauličkog proračuna prikazani su redom u Tablicama 2, 3, 4 i 5.

Tablica 2. Hidraulički proračun za kanal trapeznog poprečnog presjeka [8]

| Dubina vode | Širina dna kanala | Širina vodnog lica | Živi presjek vodotoka | Omočeni obod | Hidraulički radijus | Manningov koeficijent hrapavosti | Pad dna kanala | Brzina u kanalu | Protok u kanalu |
|-------------|-------------------|--------------------|--------------------------|--------------|---------------------|----------------------------------|----------------|-----------------|----------------------------|
| h (m) | b (m) | B (m) | A (m ²) | O (m) | R (m) | n (s/m ^{1/2}) | I (-) | v (m/s) | Q (m ³ /s) |
| 1,2 | 1,5 | 3,9 | 3,24 | 4,89 | 0,66 | 0,010 | 0,005 | 5,37 | 17,40 |
| 1,20 | 1,50 | 3,90 | 3,24 | 4,89 | 0,66 | 0,012 | 0,005 | 4,47 | 14,50 |
| 1,20 | 1,50 | 3,90 | 3,24 | 4,89 | 0,66 | 0,013 | 0,005 | 4,13 | 13,38 |
| 1,20 | 1,50 | 3,90 | 3,24 | 4,89 | 0,66 | 0,015 | 0,005 | 3,58 | 11,61 |
| 1,20 | 1,50 | 3,90 | 3,24 | 4,89 | 0,66 | 0,018 | 0,005 | 2,99 | 9,68 |
| 1,20 | 1,50 | 3,90 | 3,24 | 4,89 | 0,66 | 0,020 | 0,005 | 2,69 | 8,70 |
| 1,20 | 1,50 | 3,90 | 3,24 | 4,89 | 0,66 | 0,025 | 0,005 | 2,15 | 6,96 |
| 1,20 | 1,50 | 3,90 | 3,24 | 4,89 | 0,66 | 0,030 | 0,005 | 1,79 | 5,80 |
| 1,20 | 1,50 | 3,90 | 3,24 | 4,89 | 0,66 | 0,040 | 0,005 | 1,34 | 4,35 |

Tablica 3. Hidraulički proračun za kanal pravokutnog poprečnog presjeka [8]

| Dubina vode | Širina dna kanala | Živi presjek vodotoka | Omočeni obod | Hidraulički radijus | Manningov koeficijent hrapavosti | Pad dna kanala | Brzina u kanalu | Protok u kanalu |
|-------------|-------------------|--------------------------|--------------|---------------------|----------------------------------|----------------|-----------------|----------------------------|
| h (m) | b (m) | A (m ²) | O (m) | R (m) | n (s/m ^{1/2}) | I (-) | v (m/s) | Q (m ³ /s) |
| 1,80 | 1,80 | 3,24 | 5,40 | 0,60 | 0,010 | 0,005 | 5,03 | 16,30 |
| 1,80 | 1,80 | 3,24 | 5,40 | 0,60 | 0,012 | 0,005 | 4,19 | 13,58 |
| 1,80 | 1,80 | 3,24 | 5,40 | 0,60 | 0,013 | 0,005 | 3,87 | 12,53 |
| 1,80 | 1,80 | 3,24 | 5,40 | 0,60 | 0,015 | 0,005 | 3,36 | 10,87 |
| 1,80 | 1,80 | 3,24 | 5,40 | 0,60 | 0,018 | 0,005 | 2,80 | 9,06 |
| 1,80 | 1,80 | 3,24 | 5,40 | 0,60 | 0,020 | 0,005 | 2,52 | 8,15 |
| 1,80 | 1,80 | 3,24 | 5,40 | 0,60 | 0,025 | 0,005 | 2,01 | 6,52 |
| 1,80 | 1,80 | 3,24 | 5,40 | 0,60 | 0,030 | 0,005 | 1,68 | 5,43 |
| 1,80 | 1,80 | 3,24 | 5,40 | 0,60 | 0,040 | 0,005 | 1,26 | 4,07 |

Tablica 4. Hidraulički proračun za kanal polukružnog poprečnog presjeka [8]

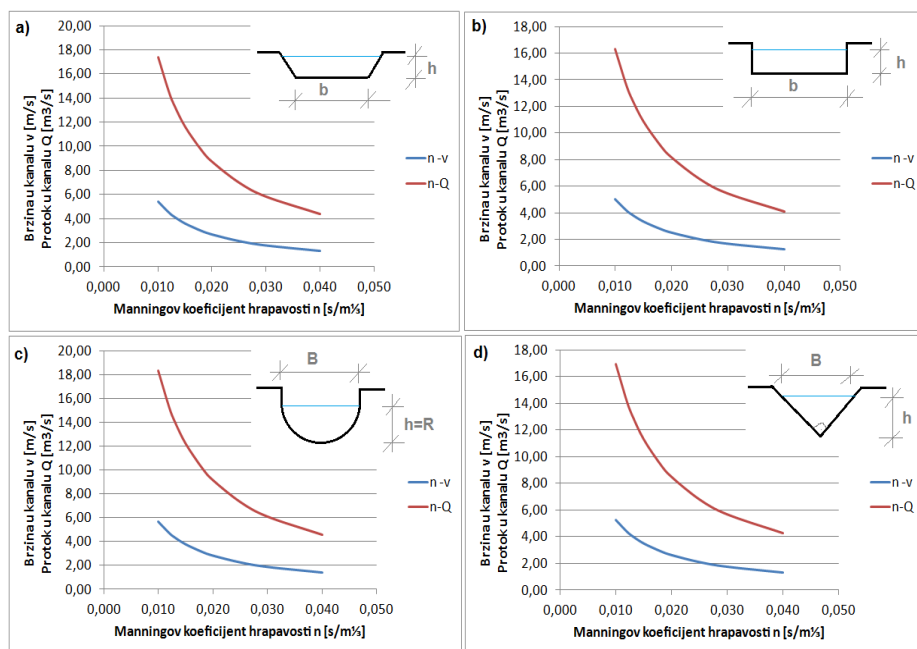
| Dubina vode | Polumjer kanala | Živi presjek vodotoka | Omočeni obod | Hidraulički radijus | Manningov koeficijent hrapavosti | Pad dna kanala | Brzina u kanalu | Protok u kanalu |
|-------------|-----------------|-----------------------|--------------|---------------------|----------------------------------|----------------|-----------------|---------------------|
| h | r | A | O | R | n | l | v | Q |
| (m) | (m) | (m ²) | (m) | (m) | (s/m ^{1/2}) | (-) | (m/s) | (m ³ /s) |
| 1,44 | 1,44 | 3,24 | 4,51 | 0,72 | 0,010 | 0,005 | 5,67 | 18,34 |
| 1,44 | 1,44 | 3,24 | 4,51 | 0,72 | 0,012 | 0,005 | 4,72 | 15,28 |
| 1,44 | 1,44 | 3,24 | 4,51 | 0,72 | 0,013 | 0,005 | 4,36 | 14,10 |
| 1,44 | 1,44 | 3,24 | 4,51 | 0,72 | 0,015 | 0,005 | 3,78 | 12,23 |
| 1,44 | 1,44 | 3,24 | 4,51 | 0,72 | 0,018 | 0,005 | 3,15 | 10,20 |
| 1,44 | 1,44 | 3,24 | 4,51 | 0,72 | 0,020 | 0,005 | 2,83 | 9,17 |
| 1,44 | 1,44 | 3,24 | 4,51 | 0,72 | 0,025 | 0,005 | 2,27 | 7,34 |
| 1,44 | 1,44 | 3,24 | 4,51 | 0,72 | 0,030 | 0,005 | 1,89 | 6,11 |
| 1,44 | 1,44 | 3,24 | 4,51 | 0,72 | 0,040 | 0,005 | 1,42 | 4,58 |

Tablica 5. Hidraulički proračun za kanal trokutnog poprečnog presjeka [8]

| Dubina vode | Širina vodnog lica | Živi presjek vodotoka | Omočeni obod | Hidraulički radijus | Manningov koeficijent hrapavosti | Pad dna kanala | Brzina u kanalu | Protok u kanalu |
|-------------|--------------------|-----------------------|--------------|---------------------|----------------------------------|----------------|-----------------|---------------------|
| h | B | A | O | R | n | l | v | Q |
| (m) | (m) | (m ²) | (m) | (m) | (s/m ^{1/2}) | (-) | (m/s) | (m ³ /s) |
| 1,80 | 3,60 | 3,24 | 5,09 | 0,64 | 0,010 | 0,005 | 5,23 | 16,95 |
| 1,80 | 3,60 | 3,24 | 5,09 | 0,64 | 0,012 | 0,005 | 4,36 | 14,13 |
| 1,80 | 3,60 | 3,24 | 5,09 | 0,64 | 0,013 | 0,005 | 4,02 | 13,04 |
| 1,80 | 3,60 | 3,24 | 5,09 | 0,64 | 0,015 | 0,005 | 3,49 | 11,30 |
| 1,80 | 3,60 | 3,24 | 5,09 | 0,64 | 0,018 | 0,005 | 2,91 | 9,42 |
| 1,80 | 3,60 | 3,24 | 5,09 | 0,64 | 0,020 | 0,005 | 2,62 | 8,48 |
| 1,80 | 3,60 | 3,24 | 5,09 | 0,64 | 0,025 | 0,005 | 2,09 | 6,78 |
| 1,80 | 3,60 | 3,24 | 5,09 | 0,64 | 0,030 | 0,005 | 1,74 | 5,65 |
| 1,80 | 3,60 | 3,24 | 5,09 | 0,64 | 0,040 | 0,005 | 1,31 | 4,24 |

Slika 2 redom prikazuje ovisnost Manningovog koeficijenta hrapavosti n te brzine u kanalu v , kao i ovisnost Manningovog koeficijenta hrapavosti n , i protoka u kanalu Q za kanal a) trapeznog, b) pravokutnog, c) polukružnog te d) trokutnog poprečnog presjeka. Iz prikazanih slika može se vidjeti kako su brzina u kanalu v te protok Q u ovisnosti od Manningovog koeficijenta hrapavosti n . Što je koeficijent hrapavosti n manji, to je veća brzina u kanalu v i protok Q , odnosno što je koeficijent hrapavosti n veći, to su brzina u kanalu v i protok Q manji. To je značajno kod prirodnih

neodržanih korita kod kojih se drastično smanjuje propusna moć korita, prvenstveno u proljetnom i ljetnom razdoblju (značajna vegetacija i obraslost korita). Primjer navedenog je oteretni kanal Butoniga kod kojeg se početkom 21. stoljeća zbog slabog održavanja propusna moć trapeznog prirodnog korita smanjila i za 2-3 puta u gornjem dijelu korita (od projektno dimenzioniranog protoka $Q=55 \text{ m}^3/\text{s}$ na svega $Q=21 \text{ m}^3/\text{s}$). Održavanje korita/kanala je jako bitna činjenica jer ona povećava propusnu moć kanala i brzu evakuaciju vode kod npr. prirasta razina vode u akumulacijama u zimskom razdoblju (mogućnost rušenja prirodno sagrađenih brana) [7].



Slika 2. Ovisnost brzine v i protoka Q o Manningovom koeficijentu hrapavosti n u kanalu a) trapeznog, b) pravokutnog, c) polukružnog i d) trokutnog poprečnog presjeka [8]

3.2. Proračun kanala za različite oblike poprečnog presjeka

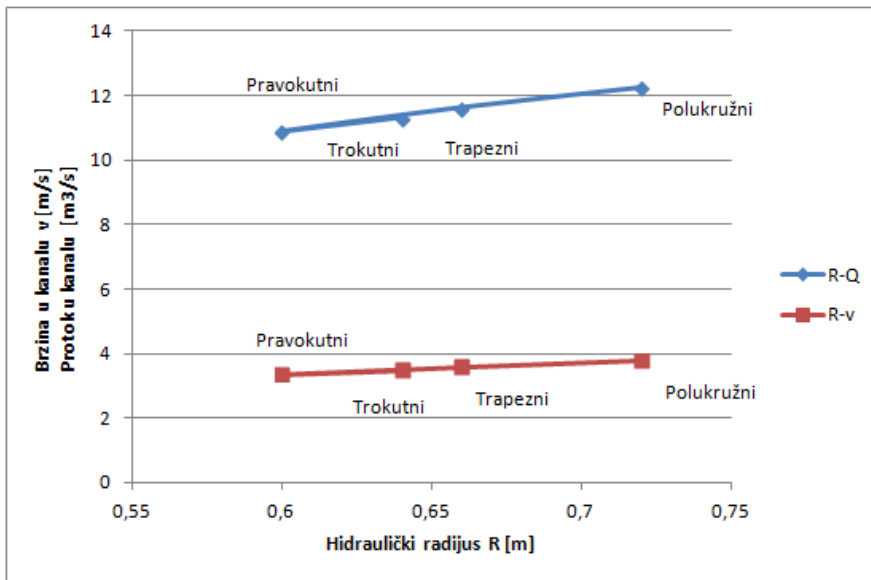
Brzina i protok u kanalu uvelike ovise i o obliku poprečnog presjeka kanala. Usporedba protoka u kanalu Q u ovisnosti poprečnog presjeka preko hidrauličkog radijusa R prikazana je na Slici 3 gdje se jasno mogu vidjeti uočene razlike. Hidraulički proračun napravljen je za trokutni, trapezni, pravokutni i polukružni oblik poprečnog presjeka kanala. Svi presjeci u primjeru imaju istu površinu živog presjeka ($3,24 \text{ m}^2$), isti koeficijent hrapavosti (u primjeru je dan za srednje dobru oblogu od opeke ili dobru betonsku oblogu; $n = 0,015 \text{ s/m}^{1/3}$) i nagib dna kanala ($0,5 \%$). Najveća

brzina u kanalu v i protok Q dobiveni su za kanal polukružnog poprečnog presjeka, dok su najmanji za kanal pravokutnog poprečnog presjeka, a u kanalu trapeznog poprečnog presjeka su veći nego kod kanala trokutnog poprečnog presjeka. Rezultati hidrauličkog proračuna prikazani su u Tablici 6.

Iz dobivenih rezultata (Slika 3) može se zaključiti da oblik poprečnog presjeka kanala ima utjecaj na protočnost u kanalu, odnosno na brzinu u kanalu v i protok Q . Iz prikazane ovisnosti različitih poprečnih presjeka kanala izraženih preko hidrauličkog radijusa R može se vidjeti da najmanja brzina u kanalu v i protok Q pripadaju kanalu pravokutnog, zatim trokutnog te trapeznog poprečnog presjeka, dok najveća brzina u kanalu v i protok Q pripadaju kanalu polukružnog poprečnog presjeka.

Tablica 6. Hidraulički proračun za različite oblike poprečnog presjeka kanala [8]

| Poprečni presjek | Dubina vode | Širina dna kanala | Širina kanala | Živi presjek vodotoka | Omočeni obod | Hidraulički radijus | Manningov koeficijent hrapavosti | Pad dna kanala | Brzina u kanalu | Protok u kanalu |
|------------------|-------------|-------------------|---------------|--------------------------|--------------|---------------------|----------------------------------|----------------|-----------------|----------------------------|
| | h (m) | b (m) | B (m) | A (m ²) | O (m) | R (m) | n (s/m ²) | I (-) | v (m/s) | Q (m ³ /s) |
| Pravokutni | 1,80 | 1,80 | 1,80 | 3,24 | 5,40 | 0,60 | 0,015 | 0,005 | 3,36 | 10,87 |
| Trokutni | 1,80 | - | 3,60 | 3,24 | 5,09 | 0,64 | 0,015 | 0,005 | 3,48 | 11,30 |
| Trapezni | 1,20 | 1,50 | 3,90 | 3,24 | 4,89 | 0,66 | 0,015 | 0,005 | 3,58 | 11,61 |
| Polukružni | 1,44 | 1,44 | 1,44 | 3,24 | 4,51 | 0,72 | 0,015 | 0,005 | 3,78 | 12,23 |



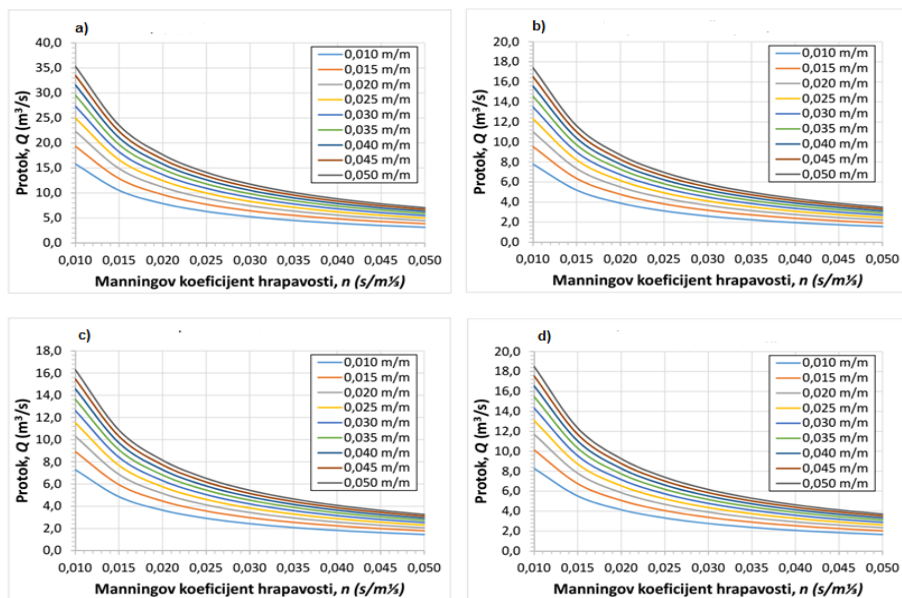
Slika 3. Ovisnost hidrauličkog radijusa sa brzinom u kanalu i protokom pri različitim oblicima poprečnog presjeka kanala [8]

Prema tome, može se zaključiti da je najpovoljniji polukružni oblik poprečnog presjeka kanala jer ima pri istoj protjecajnoj površini živog presjeka kanala A , najveći hidraulički radijus R , odnosno najmanji pad linije energije I_e . Kako je polukružni oblik kanala teško izvesti, u praksi se najčešće rade kanali trapeznog poprečnog presjeka [2].

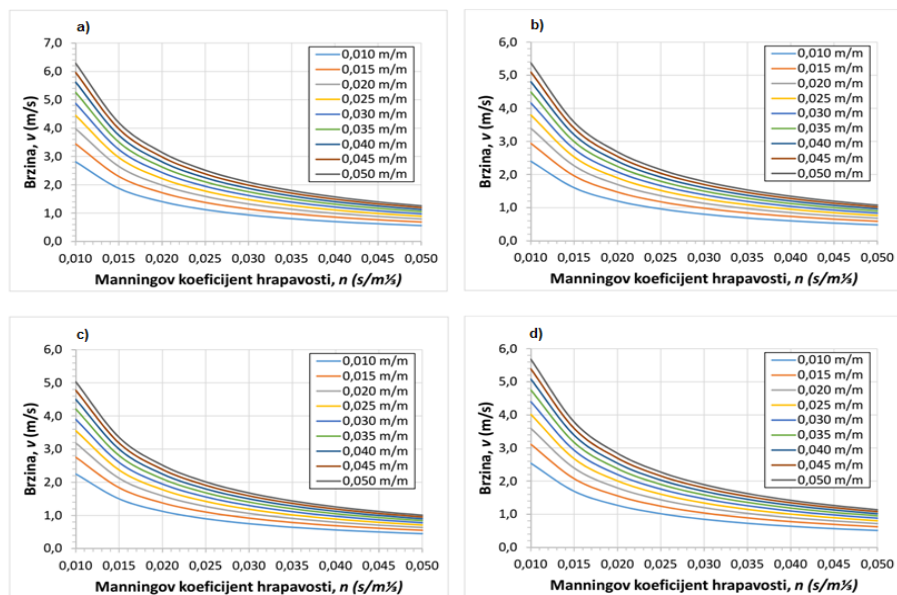
Također treba istaknuti kako za različite dimenzije (dubina vode, širina dna kanala, nagib stranica kanala) trokutnog i pravokutnog poprečnog presjeka variraju i njihovi hidraulički radijusi koji su ipak manji od kanala trapeznog i polukružnog poprečnog presjeka.

3.3. Ovisnost protoka i brzine u kanalu o koeficijentu hrapavosti te padu dna kanala

Ovisnost protoka Q i brzine v u kanalu o Manningovom koeficijentu hrapavosti n te padu dna kanala I_0 za kanal trokutnog, trapeznog, pravokutnog, te polukružnog poprečnog presjeka prikazana je redom na Slikama 4 i 5.



Slika 4. Ovisnost protoka Q o Manningovom koeficijentu hrapavosti n i padu dna kanala I_0 kod a) trokutnog, b) trapeznog, c) pravokutnog i d) polukružnog poprečnog profila kanala



Slika 5. Ovisnost brzine v o Manningovom koeficijentu hrapavosti n i padu dna kanala I_0 kod a) trokutnog, b) trapeznog, c) pravokutnog i d) polukružnog poprečnog profila kanala

Iz Slika 4 i 5 može se vidjeti kako kod svih oblika poprečnog presjeka kanala protok Q i brzina v u kanalu opadaju pri povećanju Manningovog koeficijenta hrapavosti n . U odnosu na Manningov koeficijent hrapavosti n , povećanjem pada dna kanala I_0 povećavaju se protok Q i brzina v u kanalu.

4. Zaključak

U ovom radu opisani su odnosi hidrauličkih radijusa R , Manningovog koeficijenta hrapavosti n , pada dna kanala I_0 , brzine v te protoka Q u otvorenim kanalima i koritima. Analizirani su trokutni, trapezni, pravokutni i polukružni poprečni profili prizmatičnih kanala s malim padovima dna kanala. Također, dana je i ovisnost pojedinih geometrijskih i kinematičkih fizikalnih veličina kanala. Detaljno su razrađene značajke poprečnih presjeka kanala kako bi se lakše shvatio njihov utjecaj na brzinu i propusnu moć pod utjecajem koeficijenta hrapavosti i nagiba dna kanala.

U rezultatima rada dani su grafički prikazi ovisnosti promijene brzina v i protoka Q u odnosu na varijabilnost Manningovog koeficijenta hrapavosti n , kao i njihove promijene u ovisnosti o hidrauličkom radijusu R i padu dna kanala I_0 .

Može se zaključiti kako kod svih oblika poprečnog presjeka kanala protok Q i brzina v u kanalu opadaju povećanjem Manningovog koeficijenta hrapavosti n i obratno. Također, oblik poprečnog presjeka kanala u ovisnosti od hidrauličkog radijusa R ima utjecaj na protočnost u kanalu, odnosno na brzinu u kanalu v i protok Q te se kao najpovoljniji u tom smislu može odabrati polukružni oblik poprečnog presjeka kanala koji ima pri istoj protjecajnoj površini živog presjeka kanala A , najveći hidraulički radijus R , odnosno najmanji pad linije energije I_e . Analizirajući ovisnost protoka Q i brzine u kanalu v o Manningovom koeficijentu hrapavosti n te padu dna kanala I_0 za sve oblike poprečnih presjeka kanala, oni opadaju povećanjem Manningovog koeficijenta hrapavosti n , odnosno povećanjem pada dna kanala I_0 povećavaju se protok Q i brzina v u kanalu.

Zahvala. *Ovaj je članak rezultat rada u okviru projekta Razvoj istraživačke infrastrukture na Kampusu Sveučilišta u Rijeci (RC.2.2.06-0001) koji je sufinanciran iz Europskog fonda za regionalni razvoj (EFRR) i Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH te projekta Hidrologija osjetljivih vodnih resursa u kršu (114-0982709-2549) koji je financiran od Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH. Također članak je rezultat Sveučilišne potpore za materijalno zahtjevna istraživanja Hidrologija vodnih resursa i identifikacija od poplava i blatnih tokova na krškom području financiran od strane Sveučilišta u Rijeci.*

Literatura

- [1] Jović, V. (2006) Osnove hidromehanike. 1. izdanje. Zagreb: ELEMENT.
- [2] Shaughnessy, E.J., Katz, I.M., Schaffer, J.P. (2005) Introduction to Fluid Mechanics. Oxford University. Oxford.
- [3] Agroskin, I.I. (1969) Hidraulika. Tehnička knjiga, Zagreb.
- [4] Bukurov, M., Žic, E. (2017) Mehanika fluida-teoretske osnove, radni priručnik za potrebe studenata na kolegiju Mehanika fluida i Hidromehanika. Sveučilište u Rijeci. Građevinski fakultet.
- [5] Volf, G. (2018) Vodogradnje-predavanja. Skripta. Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet.
- [6] Lončar, G., Andročec, V. (2003) Rukopis predavanja iz kolegija Mehanika fluida. Sveučilište u Zagrebu. Građevinski fakultet.
- [7] Žic, E. (2009) Analiza koeficijenta hrapavosti na primjeru kanala Butonige u Istri. Magistarski rad. Sveučilište u Rijeci. Građevinski fakultet.
- [8] Kolar, I. (2018) Analiza različitih oblika poprečnih presjeka te vrste obloge na protočnost vodotoka/kanala. Završni rad. Sveučilište u Rijeci. Građevinski fakultet.