

HIDRAULIČKA HRAPAVOST DOVODNOG TUNELA HE RAMA

Ajla MULAOMEROVIĆ
Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu

REZIME

U radu su predstavljene rezultati eksperimentalnih mjerenja hidrauličkih gubitaka na dovodnom tunelu HE Rama koja su izvršena u cilju određivanja hidrauličke hrapavosti dovodnog tunela. Rezultati se odnose na mjerenja provedena neposredno prije puštanja u pogon HE Rama 1975. kada je vršeno prinudno upuštanje zraka, te tokom eksploatacije, neposredno nakon rekonstrukcije tunela (2001. godine). Na osnovu eksperimentalnih rezultata određen je koeficijent trenja, nakon čega je, primjenom Colebrooke-ove jednačine, određena hidraulička hrapavost tunela HE Rama koja je upoređena sa sličnim betonskim tunelima u svijetu. Na osnovu srednjih mjesečnih proticaja (2004-2008.) sagledan je i uticaj smanjenja hidrauličke hrapavosti tunela na proizvodnju električne energije.

Ključne riječi: pad visine pritiska, hidraulička hrapavost, koeficijent trenja, Colebrooke-ova jednačina

1. UVOD

Skoro dva vijeka inženjeri su procjenjivati otpore trenja jer su morali projektovati i graditi cjevovode i kanale. Kratki historijski pregled pokazuje da su inženjeri još od kraja 18-tog stoljeća pokušavali da dođu do zakonitosti za otpore trenja u cijevima i kanalima, pa i rijekama. U početku se o hrapavosti nije vodilo računa, a kasnije se opisivala i za određenu vrstu graničnih čvrstih površina davani su određeni koeficijenti hrapavosti „čudnih“ dimenzija i obrazaca.

Sredinom i krajem 19. stoljeća, učinjen je značajan napor da se otkrije priroda gubitaka energije u cijevi. Obavljen je niz eksperimenata u Americi, Njemačkoj, Francuskoj i Engleskoj pri čemu su dobivene razne algebarske jednačine koje nisu bile dovoljno uopštene.

Preokret je nastao tridesetih godina 20-tog stoljeća kada je uveden pojam „apsolutne hrapavosti“ kojom se mjeri visina izbočina na zidu provodnika. Tada je hrapavost izražavana odgovarajućom veličinom, sa ispravnom dimenzijom (dužinom). Eksperimentalnim putem se došlo do zakonitosti za otpor trenja, ali za „jednoliku pješčanu hrapavost“, koja je vještački napravljena (Nikuradze-ov eksperiment). Tom prilikom hrapavost je bila određena jednim podatkom i stoga je pogodna za utvrđivanje zakonitosti na trenje. Međutim, u praktičnim primjerima hrapavost nije jednolika, niti ima oblika zrnaca pijeska. Da bi se ovaj problem riješio uveden je pojam „ekvivalentne hrapavosti“ koja daje isti otpor trenja kao „jednolika pješčana hrapavost“.

U tehničkoj praksi se za računanje koeficijenta trenja (λ) najčešće koristi Colebrook-ova formula. Razlozi za to su njezina univerzalnost (primjenljiva je za glatki, prelazni i potpuno razvijeni turbulentni režim te bilo koju vrstu fluida), fizikalno jasna struktura i dimenzionalna ispravnost.

Hrapavost zidova provodnika je zastupljena veličinom k (hidraulička hrapavost) koja, iako ima dimenziju dužine, fizički ne postoji i ne može se prema tome neposrednim mjerenjem ustanoviti. Za određeni fluidni provodnik određuje se indirektno-izvođenjem iz formula za promjenu pritiska u kojoj su sve ostale veličine poznate na osnovu direktnih mjerenja.

Promjena (pad) pritiska $\Delta p = \rho g h_f$ koja je posljedica trenja, kroz cijevi konstantnog kružnog presjeka jednak je padu linije energije i zavisi samo od gustine ρ , dinamičkog koeficijenta viskoznosti μ , srednje brzine u poprečnom presjeku v , prečnika D , dužine l i apsolutne hrapavosti provodnika k . Dimenzionalnom analizom dobiva se sljedeći izraz:

$$h_f = \frac{lv^2}{Dg} \Phi\left(\frac{vD}{\nu}, \frac{k}{D}\right) \quad (1)$$

Ako se uporedi izraz (1) sa dobro poznatom jednačinom za pad visine pritiska u cijevima (Darcy-Weisbach-ova jednačina):

$$h_f = \frac{\lambda l v^2}{2gD} \quad (2)$$

tada jednačina za koeficijent otpora λ glasi:

$$\lambda = \Phi\left(\frac{vD}{\nu}, \frac{k}{D}\right) = \Phi\left(\text{Re}, \frac{k}{D}\right) \quad (3)$$

Iz hidromehanike je poznato da se pad linije energije za **laminaran tok** (linija 1, Slika 1) u cijevima izražava:

$$\frac{h_f}{l} = \frac{32\nu v}{gD^2} \quad (4)$$

Izrazi (2) i (4) pokazuju da za laminarno tečenje pad visine pritiska ne zavisi od hrapavosti zida i da je:

$$\lambda = \frac{64\nu}{vD} = \frac{64}{\text{Re}} \quad (5)$$

Za tečenje u cijevima laminarni režim se održava sve do kritične vrijednosti Re_{cr} . Obzirom da je u dovodnim tunelima vrijednost Reynolds-ovog broja daleko veća od $\text{Re}_{cr} = 2300$, laminarni tok se u nastavku neće ni razmatrati.

Za vrijednosti Reynolds-ovog broja iznad kritične granice Re_{cr} tok kroz **prelaznu zonu** (linija 2 Slika 1) prelazi u turbulentni tok gdje su gubici energije mnogo veći nego u laminarnom toku i gdje postoje tri moguća režima: **glatki** (linija 3), **prelazni** (linija 4) od glatkog do potpuno razvijenog turbulentnog i **potpuno razvijeni turbulentni tok** (linija 5) (Slika 1) [1]. Eksponent nad srednjom brzinom u jednačini za proračun gubitka visine pritiska se mijenja od 1,75 do 2 za tok u kojem je potpuno razvijena turbulencija (linija 5). Reynolds-ov broj od kojeg počinje turbulentni tok, tj za koji je pad visine pritiska na trenje proporcionalan kvadratu srednje brzine, obilježava se Re_{sq} . Za $\text{Re} > \text{Re}_{sq}$ koeficijent otpora λ je neovisan od Reynolds-ovog broja i ovisi samo od vrijednosti $\frac{k}{D}$.

Prilikom izvođenja općeg izraza za pad visine pritiska na trenje h_f (jednačina (1)), korištena je efektivna hrapavost k . Evidentno je da koeficijent hrapavosti neće zavisiti samo od veličine izbočine na zidu-apsolutne hrapavosti, nego i od oblika, homogenosti i

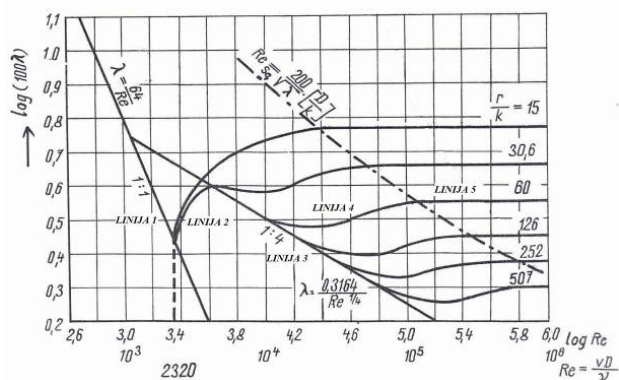
rasporeda (koncentracije hrapavosti po određenoj površini). Jednačinu (3) za homogenu hrapavost koja se dobiva tako što se na glatku oblogu bronzane (bronze) cijevi na jednakim razmacima postave zrna pijeska iste veličine, je eksperimentalno riješio Nikuradse.

Hrapavost s kojom je radio Nikuradse bila je jednolika pješćana hrapavost tj zrna pijeska iste krupnoće bila su naljepljena na zid bronzane cijevi tako da je cijela površina zida bila pokrivena zrcima, a da zrno nije bilo ljepljeno preko zrna.

Rezultujući graf koji prikazuje zavisnost između koeficijenta otpora λ , Reynolds-ovog broja $\text{Re} = \frac{vD}{\nu}$

i recipročne vrijednosti relativne hrapavosti $\frac{r}{k}$ (gdje je r prečnik cijevi a k prečnik zrna kojom je formirana hrapavost) je pokazan na Slici 1. Već pomenuti različiti režimi su jasno istaknuti i na grafiku.

Gornja razmatranja se odnose na cijevi uniformne hrapavosti kakve je koristio Nikuradse. Međutim, u stvarnosti izbočine na zidovima cijevi su različite veličine, oblika i rasporeda. Zbog toga nije moguće hrapavost cijevi opisati jednim brojem, ali je moguće govoriti o ekvivalentnoj hrapavost k koja odgovara veličini zrna iz Nikuradse-ovog eksperimenta a koja u konačnici rezultira jednakom vrijednost koeficijenta λ za tečenje u cijevi čiji je prečnik jednak prečniku razmatrane cijevi.



Slika 1. Zavisnost između koeficijenta otpora λ , Reynolds-ovog broja $\text{Re} = \frac{vD}{\nu}$ i recipročne vrijednosti relativne hrapavosti $\frac{r}{k}$ [1]

Eksperimentalni rezultati Colebrook-a i White-a (1937,1939) u kojim su se koristile cijevi različitih materijala i hrapavosti, dovele su do jedinstvenog poluempirijskog izraza koji uključuje ne samo prelaznu zonu nego i približnu aproksimaciju eksperimentalnih rezultata i izraza za glatke i hrapave cijevi:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 D} \right) \quad (6)$$

Izraz (6) se može raščlaniti na:

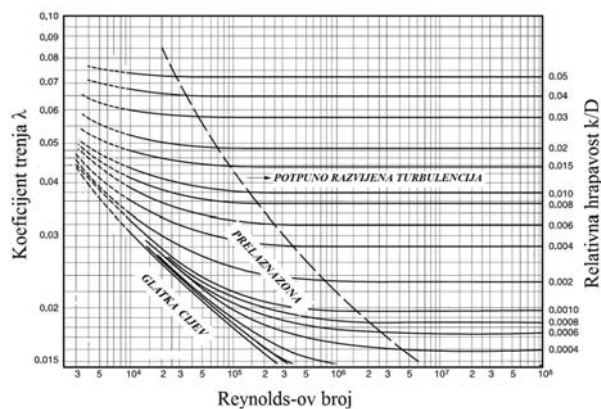
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right) \quad (7)$$

što predstavlja zakon na glatku cijev (linija 3, Slika 1), odnosno

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k}{3,71 D} \right) \quad (8)$$

zakon potpuno razvijene turbulencije (linija 5, Slika 1).

Na osnovu svih ovih studija kao i daljih mjerenja na industrijskim cijevima, Moody (1944.) je sačinio dijagram koji u vrlo širokom opsegu predstavlja vezu između λ , Re i k/D , tj predstavlja jednačinu (3), odnosno (6) (Slika 2).



Slika 2. Veza između λ , Re i k/D , Moody-jev dijagram [7]

2. UTVRĐIVANJE HIDRAULIČKE HRAPAVOSTI DOVODNOG TUNELA HE RAMA

3.1. Opći podaci o HE Rama

Hidroelektrana (HE) Rama je visokotlačno akumulaciono-derivaciono postrojenje koje koristi vode rijeke Rame na padu 325 m. Brana je sačinjena od kamenog nabačaja sa betonskim ekranom, a derivacija

je ostvarena tunelom dužine oko 9.5 km čiji je svijetli otvor prečnika 5.0 m. Karakterističan je po tome što je u toku eksploatacije podvrgnut stalnim velikim unutrašnjim pritiscima (oko 10 bara). Betonska obloga je različite debljine, ovisno o karakteristikama stijene kroz koju tunel prolazi.

Zapremina akumulacionog bazena iznosi 487 hm³, od čega je korisna zapremina akumulacije 466 hm³. Dužine akumulacionog bazena je 8 km, sa kotom uspora 595 m n.m. Brana je visoka 103 m, a u kruni duga 230 m. Krana brane je na visini 598 m n.m. Evakuacija velikih voda od 400 m³/s vrši se preko polukružnog preliva na lijevom boku, koji se nastavlja tunelom promjena 5 m i dužine 148 m i temeljnog ispusta kapaciteta 250 m³/s. U strojarnici su instalirana dva agragata sa Francis turbinama, pojedinačne maksimalne snage 86 MW.

Ukupna instalisana snaga postrojenja je 160 MW, a procjenjena proizvodnja HE Rama iznosi 694.5 GWh, od čega u četiri ljetna mjeseca 346.5 GWh, a u ostalim mjesecima 348.0 GWh.

3.2. Pregled ranijih eksperimentalnih istraživanja na dovodnom tunelu HE Rama

Do sada je na dovodnom tunelu HE Rama u dva navrata određivana hidraulička hrapavost: prvi put 1975 godine, neposredno pred puštanje u pogon hidroelektrane, a drugo mjerenje izvršeno je 2001. godine, nakon rekonstrukcije dovodnog tunela. Rezultati ovih mjerenja daju se u nastavku.

Rezultati ispitivanja iz 1975. godine [2]

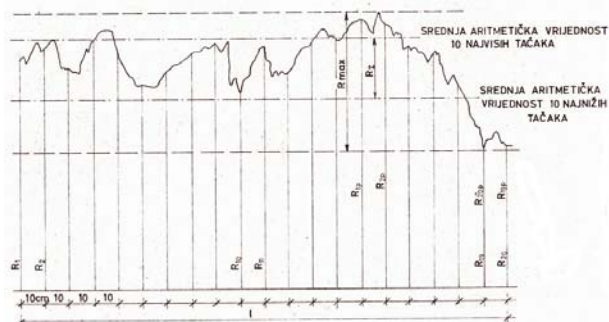
Ispitivanja provedena 1975. godine obuhvatila su:

- Mehaničko mjerenje površinskih neravnina
- Određivanje hidrauličke hrapavosti prinudnim strujanjem zraka kroz tunel

a) Mjerenje određenih parametara površinske hrapavosti na dovodnom tunelu HE Rama metodom direktnih mehaničkih mjerenja površinskih neravnina obavljeno je pomoću mehaničkog instrumenta-profilografa. Mjerenje mehaničke hrapavosti vršeno je u pravcu 4 izvodnice tunela (gore-dole, lijevo-desno). Mjerena je srednja visina neravnine u 20 tačaka koje se nalaze na međusobnom rastojanju od po 10 cm unutar referentne dužine (Slika 3).

b) Ispitivanja dovodnog tunela HE Rama prinudnim strujanjem zraka provedeno je sa sedam aksijalnih propelernih ventilatora, nominalnog kapaciteta od po

12 m³/s pri razlici pritisaka od 40 mm vodenog stuba. Instalirana snaga baterije iznosila je cca 800 kW. Mjerenje protoka, odnosno srednje brzine strujanja zraka vršilo se snimanjem profila brzina, simultano na tri načina pomoću: standardnih Pitot-Prandtl-ovih cijevi, anemometara sa užarenom žicom te preciznog anemometra sa krilcima.



Slika 3. Rezultati mjerenja neravnina tunela pomoću profilograma

Za mjerenje razlike pritisaka bio je upotrebljen precizni diferencijalni manometar sa plovkom tačnosti mjerenja ± 0,01 mm vodenog stuba čija su dva priključka bila spojena pomoću fleksibilnih PVC cijevi promjera 11/8 mm sa statičkim izvodima dvije Pitot-Prandtl-ove cijevi postavljene u krajnjim presjecima ispitivane dionice tunela.

Tokom trajanja opita registrovani su barometarski pritisak i temperatura vazduha-podaci na osnovu kojih je određena viskoznost zraka. Temperatura je mjerena živinim termometrom sa osnovnom podjelom skale u 1/10°C, a barometarski pritisak pomoću aneroida sa mogućom tačnošću očitavanja od 1/2 mm živinog stuba.

Na osnovu izmjerenih veličina određen je koeficijent otpora (λ) te je, primjenom Colebooke-ovog izraza, određena apsolutna (k (mm)) odnosno relativna hidraulička hrapavost (k/D) čije su vrijednosti, uz vrijednosti mehanički izmjerenih neravnina prikazane u Tabeli 1.

Rezultati ispitivanja iz 2001. godine

U proteklom razdoblju aktivnosti su bile usmjerene u cilju povećavanja životnog vijeka hidroelektrane, a odnosile su se na sanaciju građevinskih objekata i revitalizaciju elektromašinske opreme. Tom prilikom završena je sanacija dovodnog tunela i čvorišta, ugrađena je nova savremana upravljačka, mjerna i zaštitna oprema.

Tabela 1 Vrijednosti ekvivalente i mehanički izmerene hrapavosti dovodnog tunela HE Rama određene na osnovu mjerenja 1975. godine [2]

FLUID	DIONICA	Reynolds-ov broj	Koef. trenja	Rel. hrapavost	Aps. hrapavost	Mehanički izmj. neravnina
		Re (x10 ⁶)	λ	k/D (x10 ⁻³)	k (mm)	K (mm)
ZRAK	D ₁	1,364	0,0135	17,6	0,88	4,757
	D ₂	1,170	0,0159	22,4	1,12	4,771

Nakon sanacije, u okviru ispitivanja energetskih gubitaka i dinamičkih karakteristika HE Rama, izmjereni su gubici visine pritiska na dovodnom tunelu HE Rama (Slika Slika 4) koji su izraženi kao funkcija kvadrata proticaja tj:

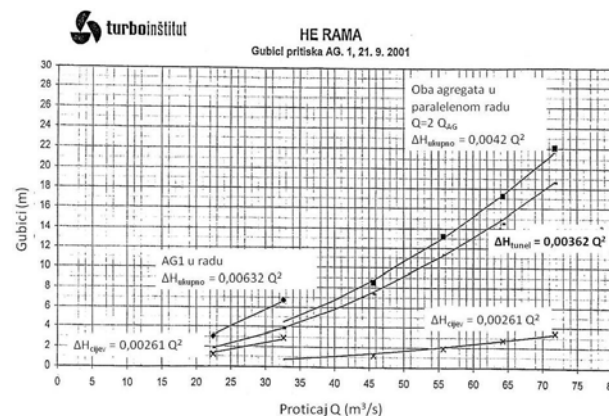
$$h_f = \zeta Q^2 \tag{9}$$

Kako je pad visine pritiska na trenje

$$h_f = \lambda \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g} = \lambda \frac{8l}{D^5 \pi^2 g} Q^2, \text{ to se } \lambda \text{ može izraziti u}$$

funkcij ζ kao:

$$\lambda = \frac{\zeta D^5 \pi^2 g}{8l} \tag{10}$$



Slika 4. Rezultati mjerenja gubitaka pritiska u zavisnosti od proticaja u dovodnom tunelu iz 2001. godine

Na osnovu dimenzija dovodnog tunela ($D = 5$ m, $l = 9517$ m) i vrijednosti proticaja $Q_{max} = 70$ m³/s (maksimalno ostvarenog tokom eksperimetna) te vrijednosti kinematskog koeficijenta viskoznosti ($\nu = 0,0114$ cm²/s za vodu pri temperaturi $t = 15$ °C)

određen je pad visine pritiska na trenje ($h_f = \zeta Q^2$ (m)) (Slika 4), pad piezometarske linije (I (%)), srednja brzina (v (m/s)), Reynolds-ov broj, koeficijent λ a na osnovu izraza (8) dobivena je apsolutna hrapavost dovodnog tunela (k) (Tabela 2). U formi pregledne tabele (Tabela 2) daju se finalni rezultati i to:

a) srednja brzina $v = \frac{4Q}{D^2\pi}$ i vrijednost ostvarenog

Reynolds-ovog broja $Re = \frac{vQ}{\nu}$ pri proticaju $Q=70 \text{ m}^3/\text{s}$

b) izračunata vrijednost koeficijenta trenja

$$\lambda = \frac{\zeta D^5 \pi^2 g}{8l}$$

c) pad visine pritiska na trenje $h_f = \lambda \frac{lv^2}{2Dg} = \zeta Q^2$ i

pad piezometarske linije $I = \frac{h_f}{l}$

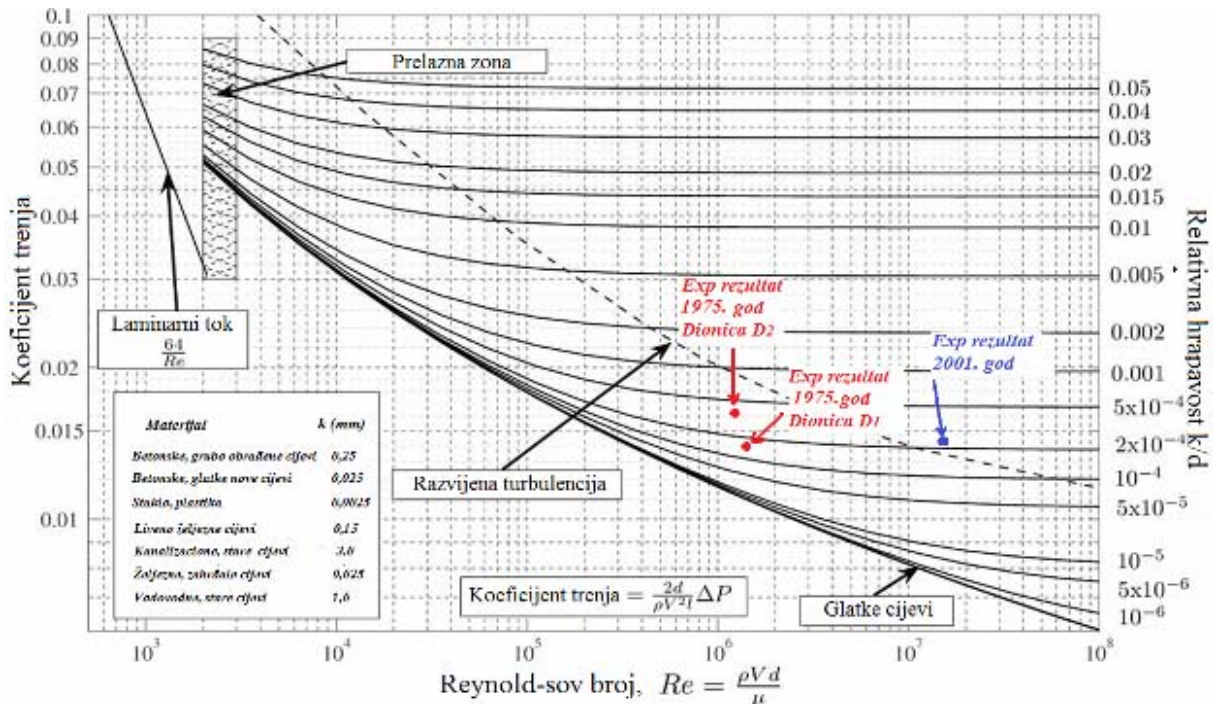
d) vrijednost relativne hidrauličke hrapavosti k/D (iz Coolbrok-ove formule za prethono određenu λ , izraz (8))

e) vrijednost apsolutne hidrauličke hrapavosti k

Tabela 2. Proračun apsolutne hrapavosti dovodnog tunela HE Rama

Fluid	Proticaj	Pad visine pritiska na trenje	Pad Π linije	Srednja brzina	Reynolds-ov broj	Koef. trenja	Rel. hrapavost	Aps. hrapavost
	Q (m ³ /s)	h_f (m)	I (%)	v (m/s)	Re ($\times 10^6$)	λ	k/D (10^{-3})	k (mm)
Voda	70	17,738	0,187	3,57	15,64	0,0144	0,25	1,25

Apsolutna ekvivalentna hrapavost određena na osnovu mjerenja iz 2001. godine iznosi 1,25 mm. Poredeći rezultate iz 1975. i 2001. godine može se primijetiti da ne postoje značajne razlike u vrijednostima hidrauličke hrapavosti tunela (k), što znači da se rekonstrukcijom tunela postigla hrapavost koja je približno jednaka hrapavosti tunela prije puštanja u pogon HE Rama (Slika 5).



Slika 5. Eksperimentalni rezultati provedenih mjerenja na dovodnom tunelu HE Rama

3.3. Usporedba vrijednosti hidrauličke hrapavosti tunela HE Rama sa nekim tunelima u svijetu

Mjera kojom se ocjenjuje kvalitet obloge provodnika predstavlja hidraulička hrapavost (k), odnosno koeficijent gubitaka (trenja) provodnika (λ).

Da bi se ocijenio kvalitet obloge, odnosno dao sud o veličini gubitaka koji se ostvaruju na dovodnom tunelu HE Rama, razmotrit će se vrijednosti ovih veličina određenih na drugim, sličnim betonskim objektima u svijetu.

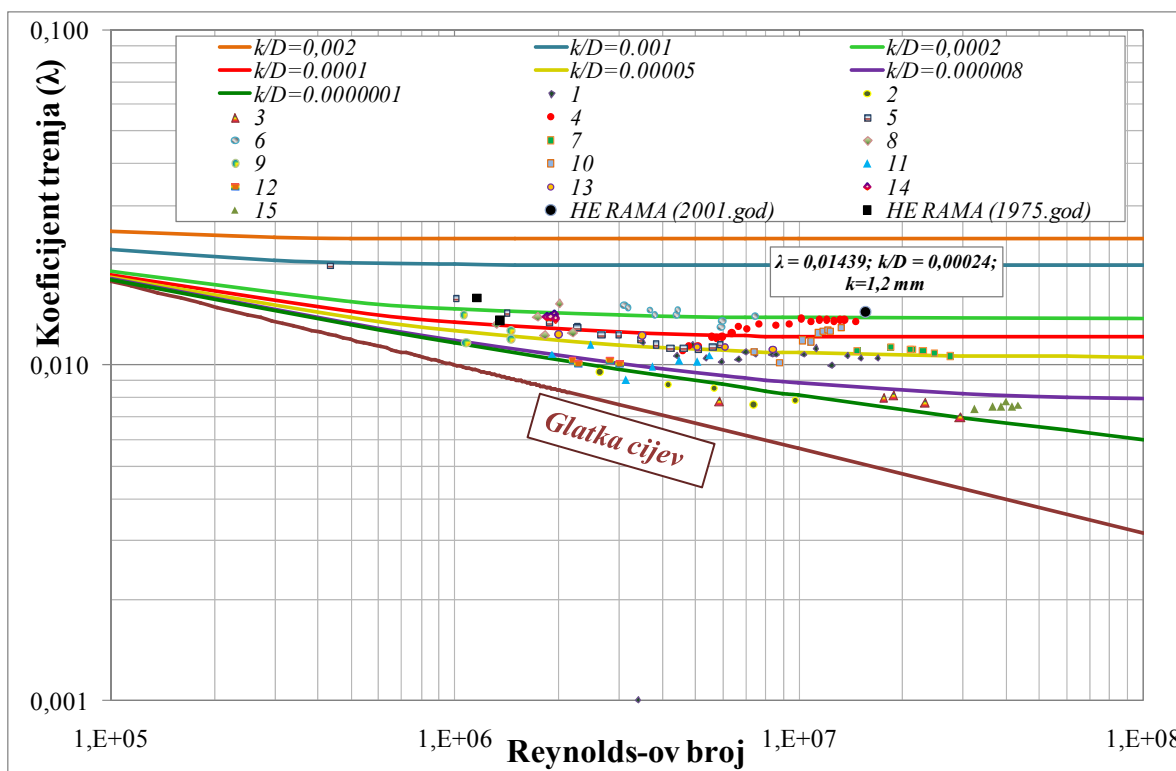
Grafička ilustracija eksperimentalnih rezultata prikazana je na Slici 6. Kao što se vidi, za svaki objekat vršeno je nekoliko mjerenja kojima su utvrđene vrijednosti koeficijenta trenja (λ) u funkciji Reynolds-ovog broja. Pored eksperimentalnih rezultata, na dijagramu prikazana je i familija krivih linija od kojih svaka predstavlja jednu vrijednost relativne hrapavosti (k/D). Očitavanjem vrijednost relativne hidrauličke hrapavosti (k/D) sa linije oko koje su grupisani

rezultati mjerenja i poznavanjem prečnika, određena je ekvivalentna hidraulička hrapavost svakog pojedinog objekta (k) (Tabela 3).

Srednja vrijednost ekvivalentne hidrauličke hrapavosti (k) dovodnog tunela HE Rama iznosi 1,08 mm. Poredeći je sa hrapavostima drugih tunela, blisku vrijednost jedino ima Apalachia tunel, dok ostali objekti imaju značajno manju vrijednost ekvivalentne hidrauličke hrapavosti.

Iako približno iste vrijednosti relativne hrapavosti (k/D) imaju Neversink tunel, sifon San Diego akvadukta i dovodni tunnel HE Rama, ekvivalentna hidraulička hrapavost dovodnog tunela HE Rama je veća zbog značajno većeg prečnika.

Srednja vrijednost hidrauličke hrapavosti navedenih objekata (neuzimajući u obzir dovodni tunnel HE Rama) iznosi $k_{sr} = 0,23$ mm što je gotovo pet puta manje od hrapavosti dovodnog tunela HE Rama.



Slika 6. Grafički prikaz vrijednosti koeficijenta trenja u funkciji Reynolds-ovog broja betonskih tunela navedenih objekata u svijetu [5] i dovodnog tunela HE Rama

Tabela 3. Vrijednosti koeficijenta trenja (λ), relativne k/D i apsolutne hidrauličke hrapavosti (k) navedenih betonskih tunela [5]

Oznaka	Objekat, lokacija	Starost (godine)	Prečnik D (m)	λ	k (mm)
1	Chelan station, State of Washington	novo	4,3	0,0105	0,21
2	Powerplant, Livenza, Italy	2	3,8	0,0044	0,0004
3	Tunnel, Ontario Power Co., Niagara Falls, Canada	8	5,5	0,0044	0,0005
4	Apalachia Tunnel, TVA, Tennessee	novo	5,5	0,0137	1,10
5	Eklunta Tunnel, Alaska	5	2,8	0,0105	0,14
6	Neversink Tunnel, New York Water Board	novo	2,4	0,0137	0,49
7	Bersimis No. 1 Development, North Quebec	novo	9,4	0,0105	0,47
8	Deer Flat, Boise project, Idaho	6	1,4	0,0120	0,14
9	Water conduit No10, Denver	4	1,4	0,0105	0,07
10	Powerplant, Melones, California	-	3,7	0,0120	0,37
11	Powerplant, Piavi-Ansiel, Italy	1	2,5	0,0078	0,02
12	Prosser pressure pipe, Yakima, Washington	4	0,8	0,0078	0,01
13	East Delaware Tunnel, New York Water Board	novo	3,5	0,0105	0,17
14	Inverted siphon, San Diego Aqueduct	8	1,4	0,0137	0,27
15	Tunnel No. 1 Niagara Water Supply	novo	13,7	0,0070	0,05
Srednja vrijednost: $\lambda_{sr} = 0,0099$, $k_{sr} = 0,23$					
	HE Rama, eksperiment 2001. godina		5	0,0144	1,25
	HE Rama, dionica D1 (eksperiment 1975. godine)			0,0135	0,88
	HE Rama, dionica D1 (eksperiment 1975. godine)			0,0159	1,12
Srednja vrijednost (odnosi se na dovodni tunel HE Rama) : $\lambda_{sr} = 0,0146$, $k_{sr} = 1,08$					

U nastavku će se razmotriti efekti smanjenja hidrauličke hrapavosti dovodnog tunela HE Rama na pad visine pritiska. Razmatrat će se slučaj apsolutne hidrauličke hrapavosti $k = 0,23$ mm što odgovara srednjoj vrijednosti hidrauličke hrapavosti navedenih betonskih objekata u svijetu i $k = 1,25$ mm što predstavlja hrapavost dovodnog tunela utvrđenu mjerenjem iz 2001. godine. Koeficijent trenja λ određen je za proticaje od 20 do 70 m³/s. Obzirom da se za manje vrijednosti proticaja tečenje odvija u prelaznoj zoni u kojoj je trenje funkcija Reynolds-ovog broja i relativne hrapavosti provodnika, koeficijent trenja λ određen je prema Colebrook-ovoj formuli (6), a njegove vrijednosti prikazane su u Tabeli 4. Pad visine pritiska za navedene proticaje (h_f) je izračunat prema izrazu (2)

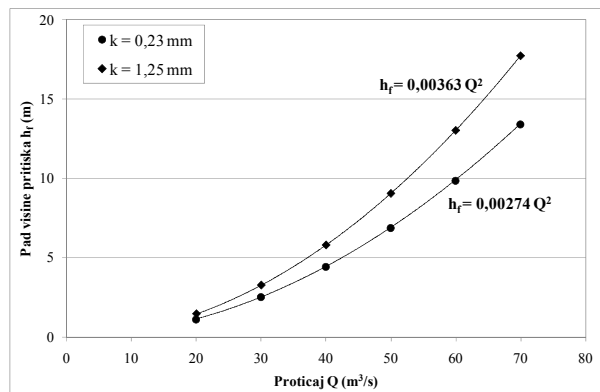
Grafička ilustracija pada visine pritiska h_f za vrijednosti koeficijenta hrapavosti $k = 0,23$ mm i $k = 1,25$ mm u funkciji proticaja dati su na Slici 7.

Sa Slike 7 se može zaključiti da se koeficijent gubitaka $\zeta = 0,00362$ s/m² može smanjiti na $\zeta = 0,00274$ s/m²

ukoliko se hrapavost sa $k = 1,25$ mm smanji na $k = 0,23$ mm. Ovakvom mjerom bi se gubitak visine pritiska a time i energije smanjio za oko 25% što predstavlja značajnu uštedu!

Tabela 4. Pad visine pritiska h_f (m) u funkciji proticaja i ekvivalentne hrapavosti k (mm) dovodnog tunela HE Rama

Q (m ³ /s)	v (m/s)	Re ($\times 10^6$)	$\lambda = f(Re, k=0,23)$ (mm)	h_f (m) u funkciji k (mm)	
				$k=0,23$	$k=1,25$
20	1,02	4,47	0,0111	1,11	1,45
30	1,53	6,70	0,0111	2,52	3,26
40	2,04	8,94	0,0110	4,43	5,79
50	2,55	11,17	0,0109	6,88	9,05
60	3,06	13,40	0,0109	9,86	13,03
70	3,57	15,64	0,0109	13,41	17,74



Slika 7. Pad visine pritiska h_f u funkciji proticaja ($Q(m^3/s)$) i koeficijenta trenja (k (mm))

3.4. EFEKTI SMANJENJA HIDRAULIČKE HRAPAVOSTI NA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE HE RAMA

Na osnovu srednjih mjesečnih proticaja u periodu 2004-2008. godine određeni su gubici izraženi u gubicima visine pritiska ($h_f = \zeta \cdot Q^2$) i gubicima električne energije kao:

$$\Delta E[kW] = \eta \cdot 9,81 [m/s^2] \cdot h_f [m] \cdot Q [m^3/s] \quad (11)$$

gdje je η kefcijent korisnog dejstva turbine, u ovom slučaju usvojeno je $\eta = 0,8$).

Iz navedenih rezultata (Tabela 5) slijedi da je tokom petogodišnjeg upravljanja akumulacijom „izgubljeno“ 52,83 GWh energije, umjesto 39,99 GWh koliko bi iznosio gubitak da je tunel glađi ($\zeta = 0,00274$). Razlika energije u iznosu od 12,84 GWh pomnožena sa jediničnom cijenom struje, koja je u ovom periodu iznosila $C = 14,98$ pf/KWh, predstavlja novčanu uštedu koja u ovom slučaju iznosi gotovo dva miliona konvertibilnih maraka (KM) ili u prosjeku oko 400.000 KM godišnje.

Da bi se dao sud o isplativosti investiranja u smanjenje hrapavosti dovodnog tunela potrebno je, osim prethodno procjenjene uštede, odrediti i troškove rekonstrukcije koji se sastoje od:

- Cijene radova (koji zavise od usvojenog tehničkog rješenja sanacija)
- Novčanih gubitaka (koji su funkcija stanja akumulacije (ukupnog raspoloživog pada) i prelivene vode tokom rekonstrukcije).

Tabela 5. Vrijednosti gubitaka električne (E_{stv}) i potencijalne (h_f) energije na dovodnom tunelu HE Rama u funkciji koeficijenta gubitka (ζ)

Godina	Srednji mj. proticaj Q (m^3/s)	$(\zeta=0,00362)$		$(\zeta=0,00274)$		Ušteda energije $\Delta E_{stv} - \Delta E_{pot}$ (GWh)	Novčana ušteda $(\Delta E_{stv} - \Delta E_{pot}) \times C$ (hiljada KM)
		Stvarni gubici $h_{f,stv}$ (m)	Gubitak energ. E_{stv} (GWh)	Gubici $h_{f,pot}$ (m)	Gubitak enrg ΔE_{pot} (GWh)		
2004	36,4	4,80	1,01	3,63	0,76	0,24	36,62
	50,52	9,24	2,69	6,99	2,03	0,65	97,91
	37,2	5,01	1,07	3,79	0,81	0,26	39,09
	29,12	3,07	0,51	2,32	0,39	0,13	18,75
	41,43	6,21	1,48	4,70	1,12	0,36	54,00
	48,64	8,56	2,40	6,48	1,82	0,58	87,38
	6,75	0,16	0,01	0,12	0,00	0,00	0,23
	7,31	0,19	0,01	0,15	0,01	0,00	0,30
	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	45,74	7,57	2,00	5,73	1,51	0,49	72,66
	41,9	6,36	1,53	4,81	1,16	0,37	55,85
21,77	1,72	0,22	1,30	0,16	0,05	7,83	
Ukupno 2004.						3,13	470,62
Ukupno 2005.						2,54	377,87
Ukupno 2006.						4,53	676,30
Ukupno 2007.						0,96	145,07
Ukupno 2008.						1,68	254,03
Ukupno za period 2004-2008.						12,84	1923,89

Pri tome treba razmotriti mogućnost smanjenja troškova koje je moguće ostvariti etapnom rekonstrukcijom i sanacijom tunela tokom redovnih rekonstrukcija prilikom kojih su gubici usljed preljevanja svakako neizbježni.

3. ZAKLJUČAK

Cilj rada je da se na osnovu eksperimentalnih istraživanja dovodnog tunela HE Rama odredi vrijednost koeficijenta trenja odnosno ekvivalentne hidrauličke hrapavosti, te da se njihove vrijednosti uporede sa vrijednostima drugih, sličnih betonskih objekata u svijetu. Pri tome je najprihvatljivije hrapavost izraziti samo jednim podatkom, ekvivalentnom jednolikom hrapavosti, i onda primjeniti Colebrook-ovu formulu.

Bez obzira na sve uvedene pretpostavke i nemogućnosti preciznog opisivanja hrapavosti površine, krajnja težnja je gubitke u provodniku svesti na najmanju moguću mjeru. Jedini način da se to

postigne jeste upotreba što je moguće gladih površina provodnika jer se smanjenjem apsolutne hrapavosti ostvaruju manji gubici pritiska što u konačnici znači veći raspoloživi pad, odnosno veću moguću proizvodnju električne energije.

Na primjeru dovodnog tunela HE Rama pokazan je uticaj smanjenja hrapavosti obloge tunela na povećanje proizvodnje električne energije i ostvarene novčane uštede.

LITERATURA

- [1] P. Novak, J. Čabelka „*Models in Hydraulic Engineering Physical Principles and Design Applications*“, Pitman Advanced Publishing Program 1981.
- [2] Z. Janežić „*Utvrdjivanje funkcionalne zavisnosti hidrauličkih i geometrijskih karakteristika provodnika fluida*“ Zavod za hidrotehniku GFS, 1975.
- [3] G. Hajdin „*Mehanika fluida-Osnove*“, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2002
- [4] G. Hajdin „*Mehanika fluida-Uvođenje u hidrauliku*“, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2002.
- [5] A Water Resources Technical Publication, Engineering Monograph No 7 „*Friction Factors for Large Conduits Flowing Full*“, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1977.
- [6] D. Prodanović „*Mehanika fluida*“ Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2007.
- [7] <http://www.ezformula.net>

HYDRAULIC ROUGHNESS OF TUNNEL HYDRO-ELECTRIC PLANT RAMA

by

Ajla MULAOMEROVIĆ
Faculty of Civil Engineering, University of Sarajevo

Summary

This paper presents the results of experimental measurements of hydraulic losses in the intake tunnel HPP Rama which was performed in order to determine the hydraulic roughness of the tunnel. The results refer to measurements carried out prior starting HPP Rama 1975th, conducted using air, and during operation, after the reconstruction of the tunnel (2001. year). Based on experimental results, roughness coefficient was determined, and after that, using Colebrook's equation,

hydraulic roughness is determined and compared with other concrete tunnels in the world. On the basis of mean monthly flow (2004-2008), it was possible to estimate the effect of decreasing the hydraulic roughness on generate electricity.

Key words: head loss, hydraulic roughness, friction resistance coefficient, Colebrook's equation,

Redigovano 16.08.2012.