

ODABIR METODE ZA PRONOS NANOSA U PRORAČUNU OPŠTE DEFORMACIJE KORITA RIJEKE ŽELJEZNICE

Nerma LAZOVIĆ, Emina HADŽIĆ
Građevinski fakultet Unverzeta u Sarajevu, B&H

REZIME

Rijeke su oduvijek mijenjale svoje korito, kako u vidu promjene uzdužnog profila i poprečnih profila, tako i u vidu promjene oblika korita u horizontalnoj projekciji. Promjene riječnog korita se dešavaju u zavisnosti od hidroloških i hidrauličkih parametara vodotoka i slivne površine, te uslijed različitih karakteristika riječnog nanosa. Kako je protok u rijeci posljedica meteoroloških i hidroloških uslova koji su stohastičkog karaktera, to se i geometrijske karakteristike riječnog korita mijenjaju na posve slučajni način, a njihova promjena se ne može sa sigurnošću predvidjeti. U praksi se najčešće koriste prognozni modeli, koji se baziraju na proračunu opšte deformacije riječnog korita i koji bi trebali dati odgovor na očekivane promjene riječnog dna kao posljedicu radova unutar ili van riječnog korita, a na osnovu postojećih podataka i rezultata mjerenja na razmatranoj riječnoj dionici. Jedan od vrlo značajnih koraka u cijelokupnom proračunu opšte deformacije riječnog korita jeste odabir adekvatne metode za proračun pronosa vučenog i suspendovanog nanosa.

Brojni autori su izučavali problematiku pronosa nanosa u riječnom koritu te su dali niz empirijskih obrazaca za proračun pronosa vučenog i suspendovanog nanosa imajući u vidu karakter vodotoka i sve njegove osobnosti.

U radu je prikazan proračun opšte deformacije korita poteza dužine cca 2 km rijeke Željeznice za period 1999-2009 godina. Proračun je izvršen primjenom različitih empirijskih izraza za proračun pronosa nanosa, a za provjeru rezultata proračuna korišteni su rezultati hidrometrijskih mjerenja, odnosno snimljeni poprečni profili. Za numeričku simulaciju opšte deformacije korišten je softver HEC-RAS.

Ključne riječi: opšta deformacija korita, vučeni nanos, pronos nanosa, HEC-RAS, Željeznica

1. UVOD

Analiza opšte deformacije riječnog korita ima za cilj da se predvide morfološke reakcije vodotoka na projektovane regulacione radove i da se osigura funkcija građevina u riječnom koritu. Opšta deformacija je posljedica neravnomjernog pronosa nanosa po dužini toka, pri čemu se ova neravnomjernost postepeno apsorbuje morfološkim promjenama u riječnom koritu u pravcu uspostavljanja ravnotežnog stanja [2]. Deformacija riječnog korita obuhvata pojave erozije ili zasipanja riječnog dna, kao i promjene položaja riječnog korita u horizontalnoj projekciji, a uslovljena je promjenom tangencijalnog napona u riječnom toku. Povećanjem ovog napona raste transportni kapacitet za nanos, sve dok ne premaši uzvodni priliv nanosa, kada počinje erozija korita. Obrnuto, smanjenje tangencijalnog napona utiče na opadanje transportnog kapaciteta, a od trenutka kada ovaj postane manji od priliva nanosa, počinje zasipanje korita [1].

U proračunu opšte deformacije riječnog korita, jedan od vrlo važnih koraka je odabir adekvatne metode za proračun pronosa vučenog i suspendovanog nanosa, pri tome imajući u vidu da se ista zrna nanosa u različitim hidrauličkim uslovima mogu smatrati vučenim, odnosno suspendovanim nanosom.

Sa konceptualnog stanovišta, metode za proračun pronosa vučenog nanosa se zasnivaju na: (i) korištenju parametara graničnog stanja – kritične brzine ili napona; (ii) direktnoj procjeni koncentracije vučenog nanosa u pokretnom sloju; (iii) razmatranju energetskih odnosa u riječnom toku; (iv) razmatranju stohastičke prirode procesa [1].

Postoji veliki broj teorijskih i empirijskih metoda za procjenu pronosa vučenog i ukupnog nanosa, što predstavlja odraz složenosti pojave i nemogućnosti da se ona tačno analitički opiše.

2. PREGLED METODA ZA PRORAČUN PRONOSA NANOSA

U numeričkoj simulaciji opšte deformacije korita rijeke Željeznice korišteno je nekoliko metoda za proračun pronosa nanosa, kao što su: (i) Ackers i White; (ii) England i Hansen, (iii) Laursen-Copeland, (iv) Meyer, Peter i Muller, i (v) Yang. U nastavku se daje kratak opis svake od metoda primjenjenih u istraživanju.

2.1 METODA ACKERS-WHITE

Metoda je razvijena 1973.godine na osnovu eksperimenata sa nanosom uniformne raspodjele veličine, u potpuno kontrolisanim uslovima sa dubinama manjim od 0,4 m i tokove u mirnom režimu sa $Fr < 0,80$. Bazira se na korištenju tri bezdimenziona parametra: D_* - parametar veličine čestice nanosa, F_{gr} - parametar pokretljivosti, G_{gr} - parametar transporta. Parametar veličine čestice nanosa D_* odražava uticaj gravitacije, gustine i viskoziteta. Parametar pokretljivosti F_{gr} predstavlja odnos smičuće sile na jedinicu površine korita i uronjene težine sloja zrna. Parametar transporta G_{gr} je baziran na konceptu snage toka.

Izrazi za proračun bezdimenzionih parametara D_* , F_{gr} i G_{gr} [6]:

$$D_* = \left[\frac{(s-1)g}{v^2} \right]^{1/3} d_{35}$$

$$F_{gr} = \frac{u_*^n}{\sqrt{gd_{35}(s-1)}} \left[\frac{V}{\sqrt{32} \log \left(\frac{10h}{d_{35}} \right)} \right]^{1-n}$$

$$G_{gr} = c \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m$$

Koeficijenti A , c i m , u izrazu za proračun parametra G_{gr} se računaju na sljedeći način:

$$A = \frac{0,23}{\sqrt{D_*}} + 0,1, \quad m = \frac{9,66}{D_*} + 1,334, \quad \log c = 2,86 \log D_* - (\log D_*)^2 - 3,53.$$

Ackers – White metoda / izraz za proračun ukupnog pronosa nanosa glasi [6]:

$$q_s = G_{gr} v d_{35} \left(\frac{V}{u_*} \right)^n$$

gdje je: D_* - parametar veličine čestice (bezdimenzionalan), d_{35} - reprezentativni dijametar čestice (m), h - dubina vode (m), v - kinematski

koeficijent viskoziteta (m^2/s), F_{gr} - parametar pokretljivosti (bezdimenzionalan), A - vrijednost parametra F_{gr} za nominalno, početno kretanje, G_{gr} - parametar transporta (bezdimenzionalan), c - koeficijent u transportnom parametru G_{gr} , m - eksponent u mobilnom parametru F_{gr} , u_* - smičuća brzina (m/s), V - srednja brzina (m/s), q_s - ukupni transport sedimenta po jedinici širine (m^2/s), s - specifična gustina (ρ_n/ρ).

2.2 METODA ENGLAND-HANSEN

Metoda Engelund-Hansen je nastala 1967.godine i bazirana je energetskom razmatranju i odnosu između parametara transporta i mobilnosti. Ova metoda za proračun ukupnog pronosa nanosa razvijena je na laboratorijskim podacima koje karakteriše stepenasta raspodjela veličine nanosa ($\sigma < 1.6$) sa srednjim dijametrom $d_{50} = 0,19$ mm, 0,27 mm, 0,45 mm i 0,93 mm. Ova metoda se ne preporučuje za nanos čije su čestice manje od 0,15 mm i geometrijska standardna devijacija veća od 2.

Parametar transporta ϕ i parametar mobilnosti θ računaju se prema sljedećim izrazima [6]:

$$\phi = \frac{q_s}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}}$$

$$\theta = \frac{u_*^2}{(s-1)gd_{50}}$$

Veza između parametara ϕ i θ je: $\phi = \frac{0,1\theta^{2,5}C^2}{2g}$

Ukupni pronos nanosa prema ovoj metodi računa se prema sljedećem izrazu [6]:

$$q_s = \frac{0,05V^5}{(s-1)^2 g^{0,5} d_{50} C^3}$$

gdje je: q_s - ukupni pronos nanosa ($m^3/s.m$), θ - parametar mobilnosti, ϕ - parametar transporta, V - srednja brzina (m/s), C - Chezy-ev koeficijent ($m^{1/2}/s$), u_* - smičuća brzina (m/s), d_{50} - srednji dijametar čestice (m), s - specifična gustina (ρ_n/ρ).

2.3 METODA LAURSEN-COPELAND

Izraz Laursen-a (1958) predviđa ukupni pronos nanosa duž kanala. Izveden je iz brojnih terenskih mjerenja koristeći srednje vrjednosti hidrauličkih parametara toka. Pronos nanosa je kvantificiran prvenstveno kao funkcija brzine toka, dubine toka i nagiba linije energije.

Veličina zrna nanosa je određena preko srednjeg prečnika i brzine taloženja za taj prečnik. Copeland (1989) je izvršio modifikaciju izraza Laursen za zrna šljunka, tako da se izraz Laursen - Copeland može koristiti za proračun ukupnog pronosa nanosa za čestice nanosa veličine od 0,1 do 30 mm.

Ukupni pronos nanosa prema ovoj metodi računa se pomoću slijedećeg izraza[7]:

$$C_m = 0.01\gamma \left(\frac{d_s}{D}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau'_o}{\tau_c} - 1\right) f\left(\frac{u_*}{\omega}\right)$$

gdje je: C_m - koncentracija nanosa (kg/m^3), γ - specifična težina vode (kg/m^3), d_s - srednja veličina zrna (m), D - dubina toka (m), τ_c - kritični smičući napon (Pa), τ'_o - smičući napon koji djeluje na zrno (Pa), u_* - smičuća brzina (m/s), ω - brzina taloženja (m/s).

2.4 METODA MEYER, PETER I MULLER

Metoda švajcarskih istraživača MPM zasnovana je na laboratorijskim ispitivanjima u kanalima širine 0,15-2,0 m, sa dubinama toka u rasponu 0,01-1,2 m i nagibima dna 0,4-20 promila. U eksperimentima su korišteni prirodni i vještački materijali krupnoće od 0,4-30 mm, gustin $s = \frac{\rho_s}{\rho} = 1,25 - 4$.

Autori su utvrdili linearnu zavisnost između intenziteta transporta $\phi^{2/3}$ i Šildsovog broja θ [1].

Bezdimenzioni pronos nanosa je izražen preko težinskog jedinčnog pronosa vlažnog materijala (nanos je mjereno bez prethodnog sušenja) [1]:

$$\phi = \frac{q'_{vt}}{g(\rho_s - \rho)\sqrt{g \cdot \Delta \cdot d^3}} = \frac{q'_{vt}\sqrt{\rho}}{[g(\rho_s - \rho)d]^3/2}$$

Bezdimenzioni izraz može se napisati u razvijenom, opštem obliku:

$$\frac{\tau_o}{g(\rho_s - \rho)d} = \theta_c + a \cdot \frac{(q'_{vt})^{2/3} \cdot \rho^{1/3}}{g(\rho_s - \rho)d}$$

Ako se ova jednačina riješi po q'_{vt} i ako se pređe na maseni jedinčni pronos suhog materijala, dobija se[1]:

$$q_{vm} = c_{mp} (\tau_o - \tau_{oc})^{3/2} [\text{kg}/(\text{sm})]$$

gdje je konstanta:

$$c_{mp} = \frac{a^{-3/2}}{g \cdot \sqrt{\rho}} \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho}\right) \left[S^2 \left(\frac{m}{t}\right)^{1/2}\right]$$

a kritični tangencijalni napon [1]:

$$\tau_{oc} = \theta_c \cdot g(\rho_s - \rho)d [\text{Pa}]$$

Vrijednosti parametara u originalnom obrascu MPM - kritičnog Šildsovog broja $\theta_c = 0,047$ i nagiba regresione prave $a=0,25$, nisu univerzalne konstante, već važe isključivo za laboratorijske uslove pod kojima je obrazac izveden. Za svaki konkretni vodotok, vrijednosti navedenih parametara moraju se odrediti na osnovu izmjenjenog pronosa. Tek tako kalibrisan obrazac može se zatim koristiti u prognostičke svrhe.

2.5 METODA YANG

Metoda Yang je nastala 1973.godine i bazirana je na hipotezi da je pronos nanosa u toku u vezi sa stopom disipacije energije. Stopa disipacije energije je definirana kao jedinica snage toka i može se izraziti kao proizvod brzine i pada (V^*S).

Ukupni pronos nanosa se može izraziti preko mase a kao funkcija jedinice snage toka[6]:

$$\log c_t = I + J \log \left(\frac{VS - V_{cr}S}{w_s}\right)$$

Yang-ovi koeficijenti su [6]:

$$I = 5,435 - 0,286 \log \left(\frac{w_s d_{50}}{9}\right) - 0,457 \log \left(\frac{u_*}{w_s}\right)$$

$$J = 1,799 - 0,409 \log \left(\frac{w_s d_{50}}{9}\right) - 0,314 \log \left(\frac{u_*}{w_s}\right)$$

Kritična brzina za početak kretanja V_{cr} : $V_{cr} = 2,05w_s$

Ukupni pronos nanosa se računa prema slijedećoj formuli:

$$q_s = 0,001c_t Vh$$

gdje je: q_s = ukupno opterećenje transporta sedimenta ($\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$), c_t = ukupni pronos nanosa izražen u ppm (parts per million – odnos mase čvrste kom. i mase rastvora) mase, V = srednja brzina (m/s), V_{cr} = brzina početka kretanja (m/s), h = dubina vode (m), S = pad dna, I, J = koeficijenti u Yangovoj funkciji ukupnog transporta

nanosa, w_s = brzina taloženja (m/s), u_* = smičuća brzina (m/s), d_{50} = srednji dijametar čestice (m), ν = kinematski koeficijent viskoziteta (m^2/s).

3. MODEL OPŠTE DEFORMACIJE RIJEČNOG KORITA

Proračun opšte deformacije korita zasniva se na slijedećim pretpostavkama: (i) tečenje je linijsko, kvazi stacionarno, (ii) efekti sekundarnih strujanja se zanemaruju i (iii) nanos je nevezan.

Pretpostavka o kvazi-stacionarnosti je prihvatljiva jer se hidraulički procesi odvijaju znatno brže od morfoloških, tako da se u numeričkoj simulaciji, ti procesi mogu razdvojeno posmatrati, a proračun značajno uprostiti. Hidrogram se aproksimira histogramom, pa se linija nivoa računa za nekoliko protoka određenog trajanja. Proračun opšte deformacije se obavlja nakon proračuna linija nivoa. Izmjena geometrije korita predstavlja ulaz za hidraulički proračun sa narednim protokom sa aproksimiranog hidrograma. Ovaj redoslijed se ponavlja, sve dok se u datom hronološkom redoslijedu ne obuhvate svi protoci. [2] [3]

Matematsko modeliranje opšte deformacije riječnog korita zasniva se na numeričkom rješavanju sistema četiri jednačine – jednačina kontinuiteta (1), jednačina održanja količine kretanja (2), jednačina kontinuiteta za nanos (3) i izabrana jednačine za pronos nanosa (4) uz zadate početne i granične uslove [1].

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + g A I_E = 0 \quad (2)$$

$$(1 - \lambda_0) \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{\partial Q_v}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$q_v = q_v(Z, Q) \quad (4)$$

gdje je: Z - nivo vode (m), Q - proticaj (m^3/s), B - širina vodnog lica (m), A - površina poprečnog presjeka (m^2), g - gravitaciono ubrzanje (m/s^2), I_E - pad linije energije, q_v - pronos vučenog nanosa.

Jednačine sistema su međusobno povezane zavisno promjenjivim $Z(x,t)$ i $Q(x,t)$, kao i kotama dna z_d koje su implicitno sadržane u geometriji profila i površini $A_d(x,t)$. Početni uslovi se sastoje od početne geometrije korita i zadatih vrijednosti Q, Z u svim računskim

profilima. Granični uslovi mogu biti spoljašnji i unutrašnji. Ako je l – dužina računске dionice, spoljašnje granične uslove čine:

a) *Uzvodni granični uslovi:* (i) ulazni hidrogram, (ii) ulazni tovar nanosa (psamogram).

b) *Nizvodni granični uslovi:* (i) izlazni hidrogram, ili (ii) kriva protoka.

c) *Geometrijski granični uslovi:* (i) nizvodni granični profil, ili (ii) uzvodni granični profil.

4. PRIMJENA MODELA NA RIJEKU ŽELJEZNCU

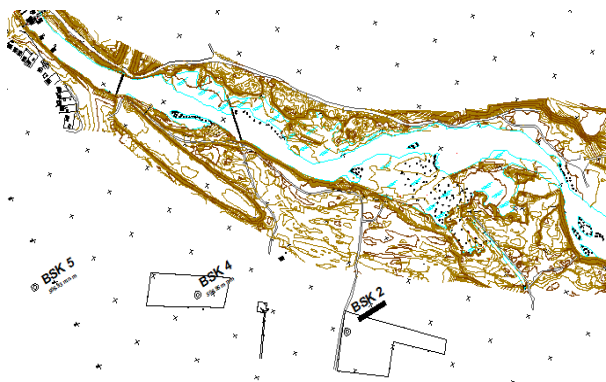
4.1 OPIS PODRUČJA

Rijeka Željeznica nastaje na planini Treskavici (2088 m n.m.) kod sela Turovi, spajanjem Hrasničkog i Godinjskog potoka a ulijeva se u rijeku Bosnu u blizini sela Osijek (općina Ilidža). Ukupna dužina toka rijeke Željeznice iznosi 26,9 km, a najznačajnije pritoke su Bijela i Crna rijeka. Željeznica spada u vodotoke izrazito bujičnog karaktera, što ima za posljedicu nestabilnost korita, te njegovo produbljivanje i rušenje obala. Obzirom na česta plavljenja, u naseljenom području na potezu dužine cca 3,5 km, između Ratnog mosta (uzvodno) do mosta u Otesu (nizvodno), rijeka Željeznica je regulisana.



Slika 1. Rijeka Željeznica na području Ilidže

Uzvodno od Ratnog mosta, rijeka Željeznica protiče kroz naselja Sokolovci i Butmir, te predstavlja dominantan izvor prihranjivanja akumulacije podzemnih voda izvorišta Sokolovci koji se koristi za snabdijevanje vodom grada Sarajeva.



Slika 2. Položaj bunara na izvorištu podzemnih voda u naselju Sokolovići u odnosu na rijeku Željeznicu [4]

Iz tog razloga neophodno je osigurati stalnu infiltraciju vode iz rijeke u akumulaciju podzemnih voda izvorišta Sokolovići, a spriječiti obrnuti proces. Svakako je poznavanje morfoloških promjena riječnog korita, jedan od načina na koji bi se dugoročno mogla obezbijediti planirana infiltracija.

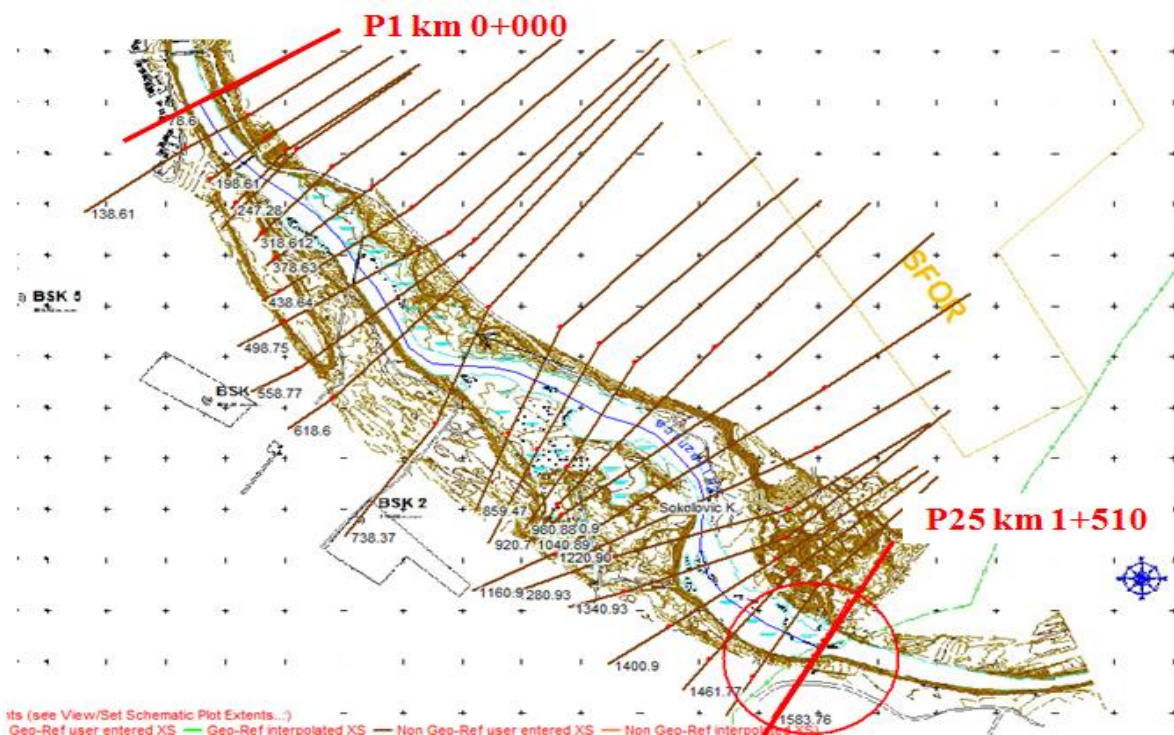
4.2 ULAZNI PODACI I POSTAVKA MODELA

Za analizu morfoloških promjena, odnosno proračun opšte deformacije korita rijeke Željeznice, odabran je potez dužine cca 2 km, od Ratnog mosta pa do Vojkovića (slika 3).

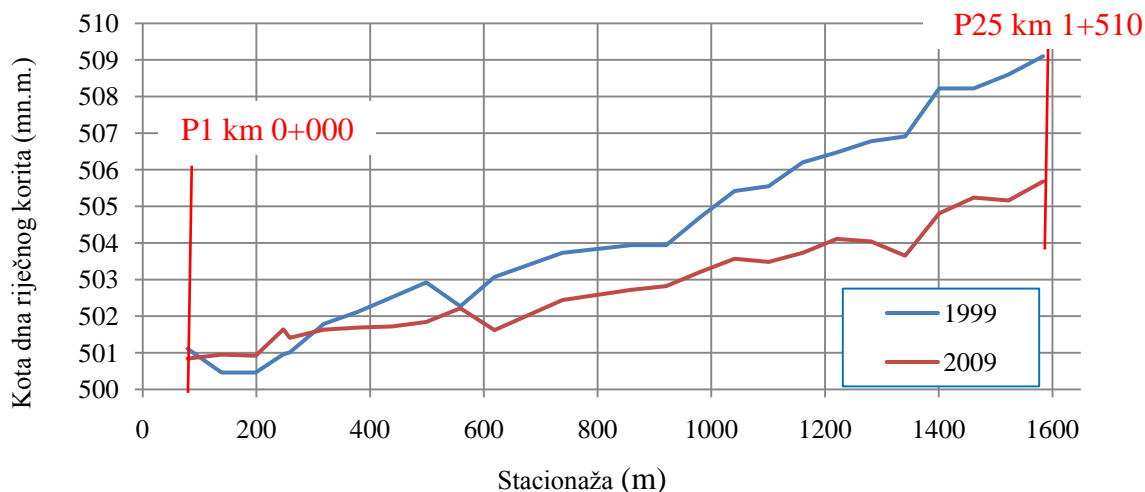
Razmatrani potez se nalazi u neposrednoj blizini bunara izvorišta Sokolovići, a rijeka na tom dijelu teče u svom prirodnom koritu.

Na ovom dijelu rijeke Željeznice vršena su terenska istraživanja u više navrata, od kojih su za proračun opšte deformacije za period 1999-2009 najznačajnija:

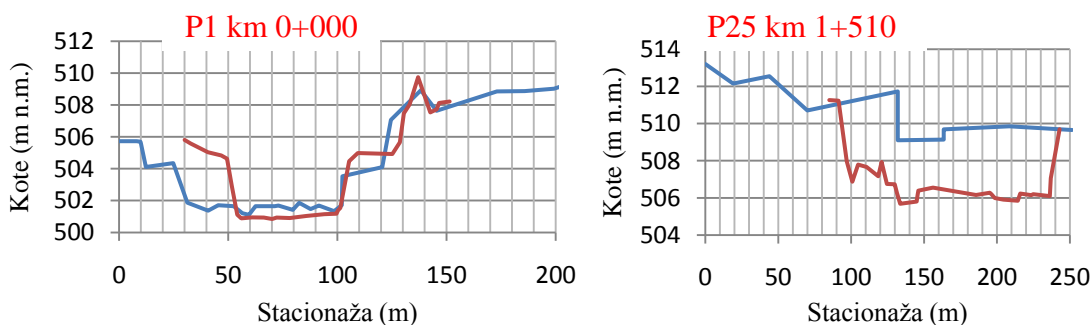
- (i) geodetsko snimanje profila iz 1999.godne (ukupno 52 profila na prosječnom razmaku oko 60m);
- (ii) geodetsko snimanje profila iz 2009.godine (ukupno 37 profila na prosječnom razmaku oko 60m);
- (iii) geološki i geomehanički istražni radovi iz 2009.godine.



Slika 3. Situativni prikaz analiziranog poteza rijeke Željeznice sa naznačenim konturnim (P1 i P25) i računskim profilima



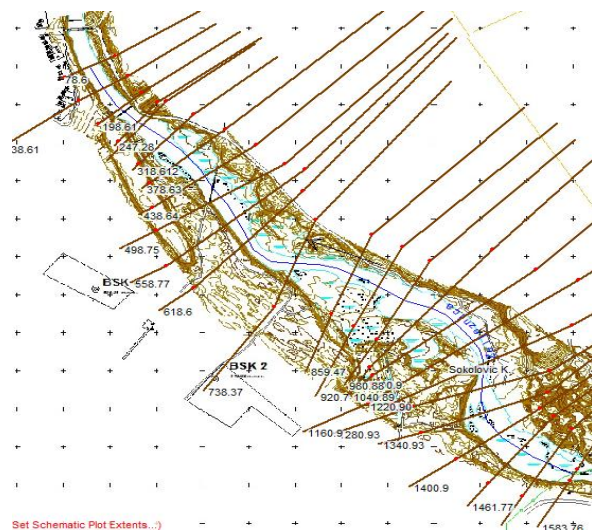
Slika 4. Uzdužni profili rijeke Željeznice (na osnovu geodetskih mjerenja iz 1999. i 2009.godine)



Slika 5. Poprečni profili rijeke Željeznice za 1999. i 2006.godnu

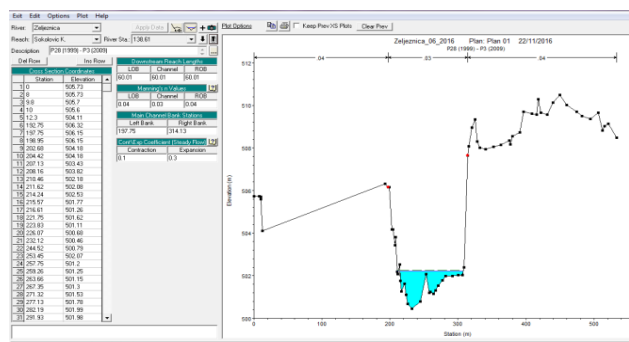
Poređenjem snimljenih poprečnih profila iz 1999. i 2009. godine uočava se značajno spuštanje nivelete riječnog korita, što je posljedica kako turbulentnog toka rijeke Željeznice u pojedinim hidrološkim periodima tako i nekontrolisane eksploatacije šljunka iz riječnog korita. Procjenjuje se da količine izvađenog šljunka iz korita rijeke Željeznice u periodu 1999-2006 iznose 543.000 m^3 , odnosno $77.540 \text{ m}^3/\text{god}$.

Numeričko modeliranje opšte deformacije riječnog korita razmatranog poteza rijeke Željeznice je vršeno primjenom softvera HEC-RAS. Primjenom softvera se riješava matematski model opšte deformacije riječnog korita odnosno sistem četiri jednačine – jednačina kontinuiteta (1), jednačina održanja količine kretanja (2), jednačina kontinuiteta za nanos (3) i izabrana jednačine za pronos nanosa (4) uz zadate početne i konturne uslove.

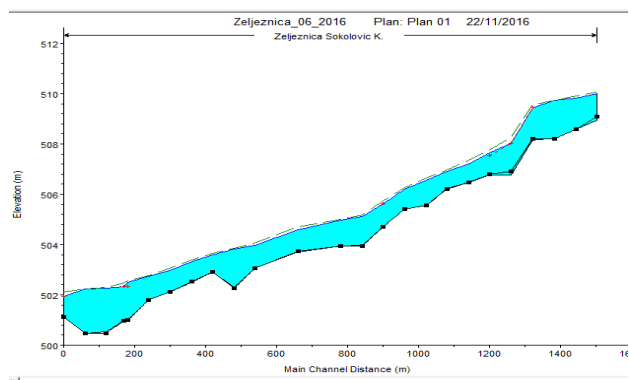


Slika 6. Situacija rijeke Željeznice u HEC-RAS softveru

Geometrijski ulazni podaci za model deformacije riječnog korita su geodetska situacija razmatranog poteza rijeke i snimljeni poprečni profili riječnog korita iz 1999.godine.



Slika 7a. Geometrijski ulazni podaci u HEC-RAS softver - poprečni profil rijeke Željeznice

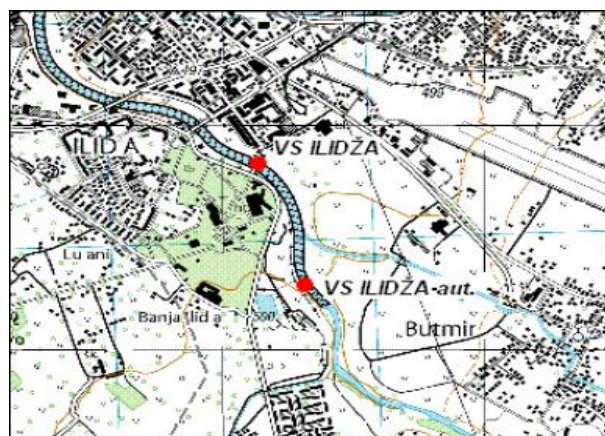


Slika 7b. Geometrijski ulazni podaci u HEC-RAS softver - uzdužni profil rijeke Željeznice

Hidrološki ulazni podaci potrebni za definsanje uzvodnog i nizvodnog konturnog uslova (hidrogram i nivogram za razmatrani vremenski period 1999-2009) preuzeti su sa automatske vodomjerne stanice V.S. Ilidža, koja se nalazi 1,3 km nizvodno od Ratnog mosta.

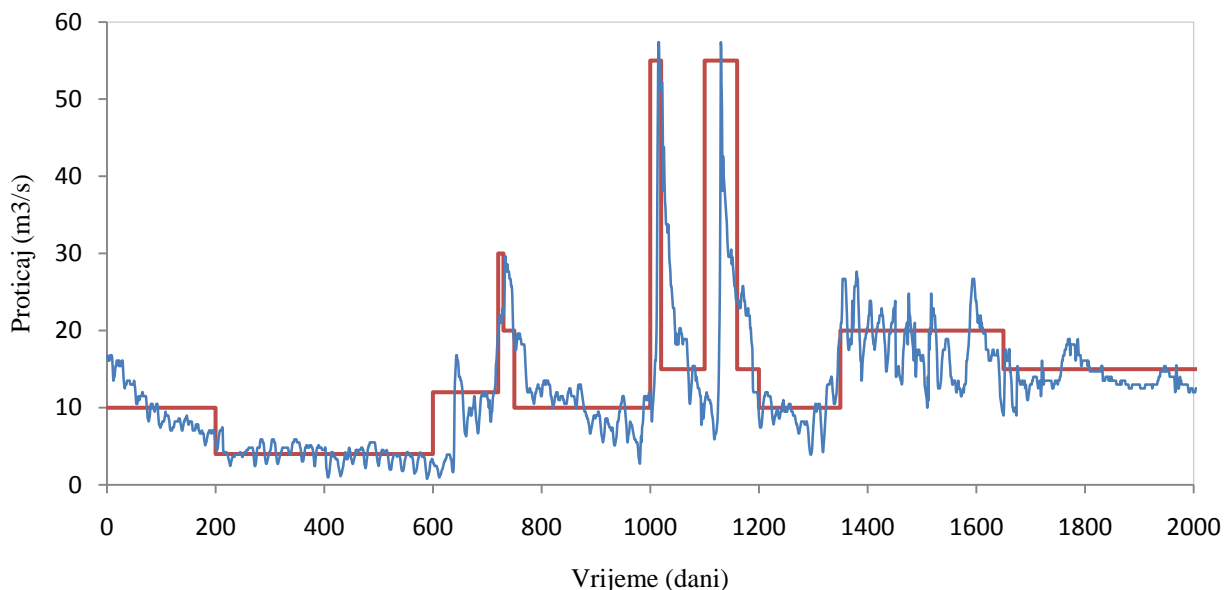
V.S. Ilidža je osnovana 1966. godine, a sa radom je prestala krajem 1968. godine, kada je prilikom prolaska vala velike vode došlo do oštećenja stupa mosta na

kojem je bio postavljen instrument. Stanica je obnovljena 1982. godine ali na drugom lokalitetu, cca 550 m uzvodno (lokalitet današnje V.S. Ilidža - aut), a bila je opremljena limnigrafom. Na vodomjeru su vršena isključivo jednokratna dnevna osmatranja vodostaja, sve do kraja 2005. godine kada je postavljena automatska stanica (vremenska diskretizacija mjerenja je 1 sat) sa mogućnošću teletransmisije podataka u realnom vremenu.



Slika 8. Lokacija VS Ilidža i VS Ilidža-aut

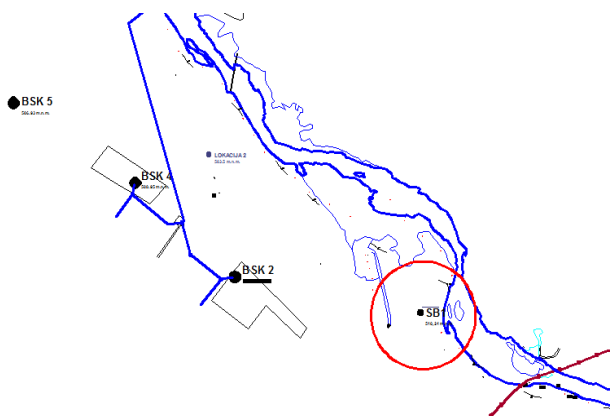
Osnovni podaci o V.S. Ilidža-aut	
Sliv:	Bosne
Koordinate:	širina 43° 49' 25" dužina 18° 18' 53"
Kota "0" vodomjera:	496,07 m n.m.
Udaljenost od ušća:	cca. 3,1 km
Površna sliva:	cca. 399 km ²
Sastav dna korita:	šljunak i mulj
Opis obale:	korito uređeno
Godina osnivanja:	1982.



Slika 9. Hidrogram i histogram sa V.S. Ilidža - aut (prikaz jednog dijela - za period 01.01.-31.03. 2006.godine)

Podaci o inženjersko-geološkim karakteristikama tla na lokaciji razmatranog poteza rijeke Željeznice su dobiveni na osnovu istražnih radova [4] koji su obuhvatili izvođenje jedne istražne bušotine dubine 22,0 m čija je lokacija prikazana na slici 10.

Iz istražne bušotine uzeti su uzorci tla (slika 11) za geomehanička laboratorijska ispitivanja nakon čega je izvršena klasifikacija tla. Dubine i položaj pojedinih litoških članova tla dati su na inženjersko - geološkom presijeku terena (slika 12).



Slika 10. Lokacija istražne bušotine



Slika 11. Uzorak materijala tla iz iskopane bušotne (kota trena 510,52 m n.m.) - dio bušotine

Na osnovu terenskih istražnih radova je utvrđeno da razmatrani lokalitet izgrađen od nasipa i aluvijalnih sedimenata.

Nasip (tehnoгене tvorevine - pokrivač, sloja 1a) je izdvojen na cijelom prostoru predmetne lokacije, nastao je odlaganjem raznog materijala u toku višegodišnjeg odlaganja građevinskog otpada i uravnljenja terena, izuzetno heterogenog sastava kako materijalnog tako i granulometrijskog, vrlo promjenljivih kvalitativno-

kvantitativnih svojstava kao i debljine. Istražnim bušenjem je konstatovano da se debljina nasipa kreće do 1,00 m u zoni bušotine.

Aluvijalni pokrivač (slojevi 2 i 3) konstatovan je na cijelom prostoru predmetne lokacije ispod tehnogenog pokrivača, a predstavljen je zaglinjenim šljuncima i šljuncima pjeskovitim srednjedositnoznim debljine >22,0 m (jer su bušotine završene u ovom sloju). Aluvijalni pokrivač je slabe složenosti i relativno dobre zbijenosti, te dobrih fizičko-mehaničkih karakteristika.

Najveći dio terena na prostoru ovog lokaliteta uz rijeku Željeznicu izgrađen je od aluvijalnih sedimenata (A1 2) izgrađenih od šljunaka, pijesaka i glina. Opšta karakteristika ovog inženjersko-geološkog kompleksa je litološka i petrografska heterogenost, nehomogenost i vrlo izražena anizotropija fizičko-mehaničkih svojstava. Pojedini litološki članovi se bočno i vertikalno međusobno smjenjuju, uz česte postupne prelaze jedne frakcije u drugu. Granulometrijski sastav ovih naslaga je veoma naujednačen.

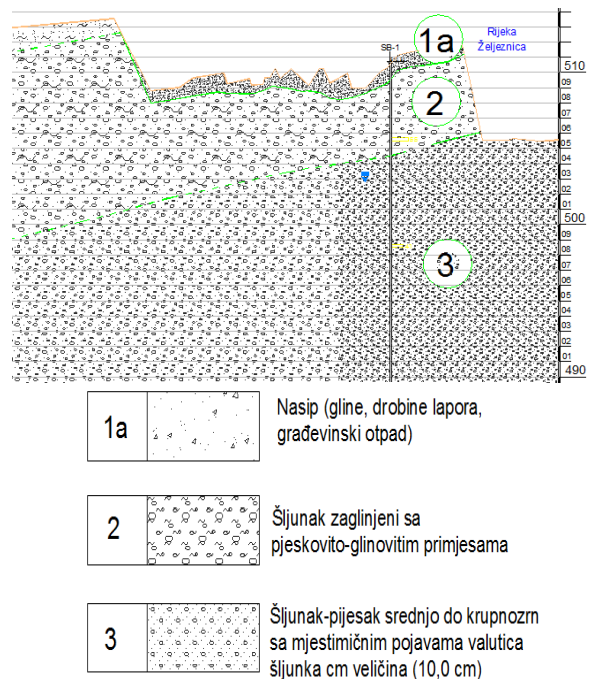
Donje dijelove kompleksa čine grubozrni šljunkovi, koji leže preko supstrata. Debljina sloja šljunka je preko 25,0m, jer su neke bušotine (iz ranijih istražnih radova na ovom prostoru) završene u ovom sloju. Preko njih leže naslage srednje do sitnozrnih šljunkova u gornjoj zoni malo zaglinjeni ali uz česta roslojavanja naslaga.

Ovakve česte promjene sedimentoloških karakteristika aluvijalnih naslaga ukazuju na dosta promjenljiv riječni režim rijeke Željeznice.

Geološki supstrat nije konstatovan istražnim bušenjem ali je registrovan ranijim ispitivanjima na predmetnoj lokaciji. U pogledu litološkog sastava ovaj kompleks naslaga odlikuje se velikom litološkom heterogenošću i izvanrednom anizotropnošću zbog čestog, većinom ritmičnog, izmjenjivanja različitih litoloških članova: lapora, pješčara, konlomerata i brečastih krečnjaka. Tektonski je oštećen ispucao a po površini je raspadnut u vidu tanke raspadine sa odlomcima matičnih stijena. Posjeduju vrlo povoljna fizičko-mehanička svojstva.

4.3 SIMULACIJE BUDUĆIH STANJA

Za uspostavljanje modela, kao konturni uslovi, korišteni su navedeni terenski podaci, rezultati hidroloških mjerenja protoka i nivoa vode sa automatske vodomjerne stanice Ilidža, kao i podaci o veličini i pronosu nanosa u riječnom koritu na razmatranom potezu.



Slika 12. Inženjersko - geološki profil terena

Modeliranje opšte deformacije korita rijeke Željeznice je vršeno za period 1999-2009, tako da su za ulazne geometrijske podatke uzeti snimljeni poprečni profili iz 1999.godine. Rezultati modela predstavljaju izgled riječnog korita u 2009.godini i poređeni su sa snimljenim podacima iz 2009.godine.

Prilikom numeričkog modeliranja izgleda riječnog korita težište je bilo na odabiru metode, odnosno empirijske jednačine za pronos nanosa (jednačina 4. iz sistema jednačina) koja najbolje opisuje opštu deformaciju riječnog korita.

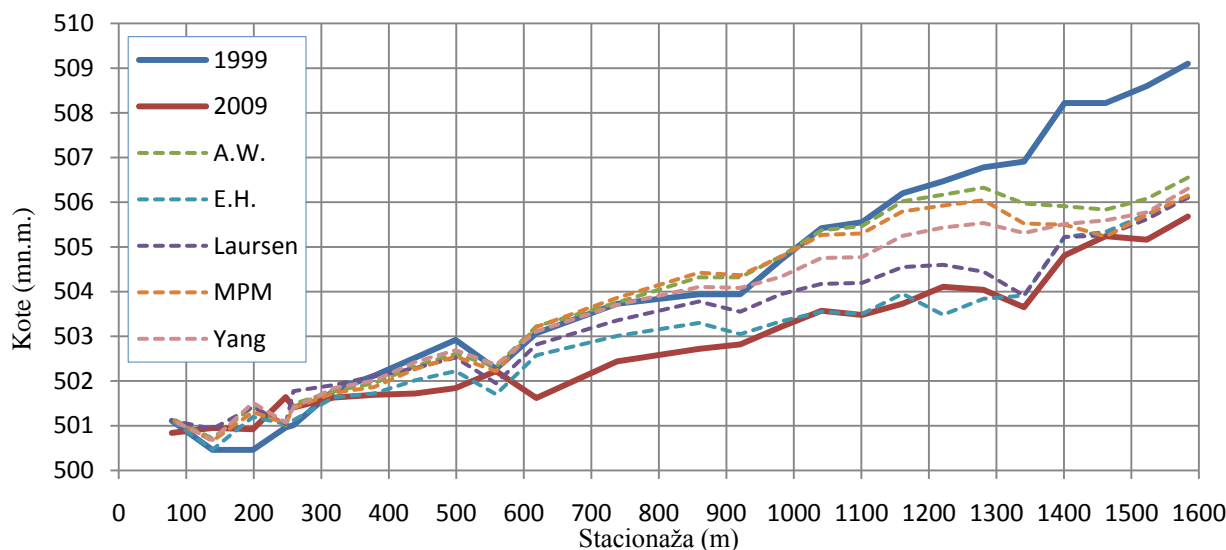
5. REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 13. su prikazani rezultati modeliranja deformacije korita rijeke Željeznice dobijeni na osnovu stvarnih rezultata osmatranja (godine 1999. i 2009.), te rezultati modeliranja dobijeni primjenom različitih metoda za proračun pronosa nanosa: (i) Ackers i White; (ii) England i Hansen, (iii) Laursen-Copeland, (iv) Meyer, Peter i Muller, i (v) Yang. Uočava se dosta veliko odstupanje rezultata za pojedine metode, što je bilo i za očekivati uzimajući u obzir uvjete pri kojima su metode izvođene. Na osnovu rezultata modeliranja, moguće je primijetiti, na osnovu poređenja modeliranih stanja i snimljenih podataka iz 2009. godine, da metode koje najbolje opisuju, odnosno prognoziraju izgled

riječnog korita rijeke Željeznice u 2009.godini jesu metoda England-Hansen i metoda Laursen-Copeland.

Objašnjenje za ovo nalazi se u činjenici da je riječni nanos rijeke Željeznice na ovom potezu šljunak, a ove metode, od svih navedenih najbliže opisuju pronaš šljunkovitog nanosa.

Također, sa slike 13. uočava se da obje metode prilično precizno predviđaju izgled korita na uzvodnom dijelu, dok na srednjem dijelu razmatranog poteza, stvarni izgled riječnog korta u 2009.godini je do oko 1m ispod modeliranog scenarija. Objašnjenje se nalazi u pojavi eksploatacije rječnog šljunka na ovom potezu u toku razmatranog perioda.



Slika 13. Prikaz rezultata modeliranja deformacije korita rijeke Željeznice za period 1999-2009 primjenom različitih metoda za proračun pronosa nanosa

6. DISKUSIJA I ZAKLJUČCI

1. Numeričke simulacije fizičkih procesa omogućavaju detaljnu analizu promijena hidrodinamičkih veličina i morfologije riječnog korita, što je od velikog značaja za hidrotehničku praksu. Za uspostavljanje numeričkog modela i njegovog pouzdanog korištenja, od izuzetnog značaja su terenska istraživanja i mjernja (geodetska, hidrološka, geološka, mjerenja pronosa nanosa itd.).

2. Na razmatranom potezu rijeke Željeznice u periodu između 1999. i 2009. godine, evidentne su značajne morfološke promjene. Na osnovu analize snimljenih poprečnih profila, a što pokazuju i rezultati modela, konstatovano je produbljivanje riječnog korita na najvećem dijelu toka.

3. Postoji veliki broj teorijskih i empirijskih metoda za proračun pronosa vučenog i ukupnog nanosa, a odabir adekvatne metode, predstavlja značajan problem u proračunu opšte deformacije riječnog korita.

4. Poređenjem rezultata modela i snimljenih profila iz 2009.godine, uočava se da metode koje najbolje opisuju, odnosno prognoziraju izgled riječnog korita rijeke Željeznice u 2009.godini jesu metoda England-Hansen i metoda Laursen-Copeland. Objašnjenje se nalazi u činjenici da su hidraulički uslovi te karakteristike nanosa na rijeci Željeznici najbliži uslovima pri kojima su izvedene navedene metode.

LITERATURA

- [1] Jovanović M., Regulacija reka - rečna hidraulika i morfologija, Građevinski fakultet, Beograd, 2002.
- [2] Jovanović M., Komatina D., Primena metode Van Rijna u proračunu opšte deformacije dunavskog korita, Vodoprivreda 1994/1-3, 1994.
- [3] Jovanović M., Kapor R., Prodanović D., Zindović B., Numerička simulacija koncentrisanog ispuštanja izbagerovanog nanosa u maticu reke, Vodoprivreda, Vol. 39, br. 1-3, 2007.

- [4] Institut za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Sarajevu, Glavni projekat uređenja korita rijeke Željeznice od naselja Butmir do mosata u Vojkovićima, Sarajevo, 2010.godina
- [5] Institut za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Sarajevu, Idejni projekat regulacije rijeke Željeznice, Sarajevo, 1999.godina
- [6] Habibi M., PhD Thesis, Sediment transport estimation methods in river systems, University of Wollongong, 1994.
- [7] Haschenburg J.K., Curran J., Sediment Transport Modeling of Reach Scale Geomorphic Processes, Final Report for TWDB Contract No 0904830899, 2012.
- [8] HEC-RAS uputstvo za korištenje modela.

SELECTION OF METHODS FOR SEDIMENT TRANSPORT IN THE CALCULATION OF MORPHOLOGICAL CHANGES OF ŽELJEZNICA RIVER BED

by

Nerma LAZOVIĆ, Emina HADŽIĆ
Faculty of Civil Engineering, Sarajevo

Summary

Rivers have always changed their riverbeds, both in terms of changes in longitudinal profile and cross sections, as well as a modified form in the horizontal projection. Riverbed changes occur depending on the hydrological and hydraulic parameters of watercourses and catchment areas, and due to the different characteristics of alluvial deposits. As the flow in the river a result of meteorological and hydrological conditions that are stochastic, it is the geometrical characteristics of the riverbed changes in a completely random manner, and their changes can not be predicted with certainty. In practice, the most commonly used forecasting models, which are based on the calculation of the general deformation of the riverbed and that should give the answer to the expected changes in the river bottom as a result of working inside or outside the river bed, and on the basis of existing data and the results of measurements on the considered river section. One of the most important steps in the overall calculation of the general deformation of the riverbed is

the selection of appropriate methods for the calculation of bed load and suspended sediment.

Many authors have studied the problem of sediment in the river bed and gave a series of empirical forms for calculation of bed load and suspended sediment having in mind the character of the watercourse and all its peculiarities.

This paper presents a calculation of morphological changes of the riverbed move (length of approximately 2 km) for the period 1999-2009 years. The calculation is done by applying the various empirical expressions for sediment transport, and to check the results of calculation were used the results of hydrometric measurements (using cross-sections). For the numerical simulation of morphological changes of the river bed was used software HEC-RAS.

Key words: deformation of riverbed, bed load sediment, sediment transport, HEC-RAS, Željeznica

Redigovano 5.11.2018.