KALNOST V REKAH KOT DEL EROZIJSKO-SEDIMENTACIJSKEGA KROGA

SUSPENDED LOADS IN RIVERS AS A PART OF THE EROSION AND SEDIMENTATION CYCLE

prof. dr. Matjaž Mikoš, univ. dipl. inž. grad.,

Znanstveni članek

UDK 551.3:556.023:556.536

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana, matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si

Povzetek Kalnost v rekah je odvisna od dotoka erodiranih zemljin iz povirnih delov, stranskega dotoka iz hudourniških pritokov in rečnega erozijskega delovanja. Za naravno kalnost kot del erozijsko-sedimentacijskega kroga je značilna velika prostorska in časovna spremenljivost, ki jo določajo trenutne lokalne hidravlične razmere v reki. Za razumevanje procesov premeščanja rečnih sedimentov je nujno dobro poznavanje glavnih hidravličnih parametrov rečnega toka in parametrov rečnih plavin. V članku se omejujemo na lebdeče plavine, ki se v rekah premeščajo z vodnim tokom, in pregledno prikažemo izbrane parametre, ki so nujni za analizo njihovega premeščanja. Najprej obravnavamo različne enačbe za določitev hitrosti posedanja sedimentnih delcev, s katero lahko ocenimo verjetnost, da je sedimentni delec znane velikosti, gostote in oblike v lebdečem (suspendiranem) stanju. V drugem delu članka na osnovi znane hitrosti posedanja sedimentnih delcev izpeljemo teoretično vertikalno porazdelitev njihove koncentracije v turbulentnem toku. Ta porazdelitev je nujna teoretična osnova za terensko vzorčenje suspendiranega sedimenta v rečnem toku. Hidravlične osnove, prikazane v tem članku, so teoretična podlaga za razumevanje različnih metod terenskega vzorčenja suspendiranih rečnih sedimentov.

Ključne besede: eksperimentalna hidravlika, erozija, hidrologija, laboratorijske raziskave, lebdeče plavine, rečna hidravlika, rečni sedimenti, sedimentacija

Summary | Natural turbidity in rivers is a function of the inflow of eroded soils from the rivers' headwaters, of the lateral inflow from torrential affluents and of fluvial erosion action. For natural turbidity as a part of erosion and sedimentation cycle, large spatial and temporal variability is characteristic, which is determined by momentary local hydraulic conditions in a river. For understanding of suspended sediment transport processes good knowledge of main hydraulic parameters of the river flow and of main parameters of fluvial sediments is essential. This paper limits the treatment to suspended sediments only; to the part of fluvial sediments that are transported within the river flow (without a contact with the riverbed), and reviews selected parameters, which are essential for the analysis of suspended sediment transport. Firstly, different equations for settling velocity of sediment particles are treated, which is used to assess the probability that a sediment particle of known size, density, and form is in a suspended state. In the second part of the paper, theoretical vertical concentration profile of suspended particles in a turbulent flow is derived on the basis of known particles' settling velocity. This profile is a theoretical basis for field sampling of suspended sediments in a river flow. The hydraulic bases, shown in this paper, are theoretical foundation for the understanding of different field sampling methods for suspended river sediments.

Key words: erosion, experimental hydraulics, fluvial hydraulics, fluvial sediments, hydrology, laboratory experiments, sedimentation, suspended sediments

1 • UVOD

Prvi korak v erozijskem krogu nižanja zemeljskega površja je premeščanje v glavnem drobnozrnatih zemljin z zemeljske površine in v glavnem bolj grobozrnatega erozijskega drobirja iz izvorov plavin (angleško sediment sources; nemško Geschiebeherden) v hudourniških območjih po erozijskih jarkih in hudournikih v rečno mrežo. Erozija (odnašanje, odplavljanje; angl. erosion) in sedimentacija (odlaganje, nanašanje; angl. sedimentation) se prepletata na poti rečnih sedimentov skozi celotno porečje (angleško river basin, nemško Flußgebiet) od mest nastanka do mest končne sedimentacije (za podrobno obravnavo problema glej npr. (Rusjan in Mikoš, 2006)). Rečne sedimente (angleško fluvial sediments; river sediments; nemško Flußsedimente), ki se premeščajo z rečnim tokom, imenujemo v slovenščini strokovno plavine (nemško Feststoffe). Posledica premeščanja plavin sta kalnost (angleško suspended load) in prodonosnost (angleško bed load) rek. V slovenščini imata ta dva izraza dvojni pomen, in sicer na eni strani izražata masni ali prostorninski tok na časovno enoto (npr. kg/s; t/leto; m³/leto), na drugi pa označujeta rečni material, ki se premešča in povzroča kalnost in prodonosnost kot dve vrsti med seboj tesno povezanih naravnih pojavov (Mikoš, 2002). Prodonosnost je tako na eni strani izraz za pojav in na drugi strani za dejanski pretok rinjenih plavin (angleško bed material; nemško Geschiebe), ki se premeščajo po dnu ali poskakujejo v rečni tok (angleško saltation load), a ostajajo v bližini rečnega dna. Kalnost v reki (in posledično motnost, da ne vidimo rečnega dna) povzročajo kalni delci (angleško wash load), načeloma drobni sedimenti velikosti gline in melja, ki v reko pritekajo zaradi površinskega spiranja zemljin in se skozi rečni sistem premeščajo v suspenziji tudi ob normalnih pretokih skoraj neovirano, to je brez posebnega odlaganja in s tem izmenjave z rečnimi sedimenti v dnu (Mikoš, 2005). Poleg tega dela kalnosti, ki bi jo lahko imenovali tudi naravna kalnost (ali sprane plavine; gre za dobesedni prevod angleškega izraza wash load), v času povišanih pretokov v rekah (tj. predvsem v času poplavnih valov) h kalnosti prispevajo pomemben del tudi lebdeče plavine oziroma suspendirane snovi (angl. suspended matter, nem. Schwebstoffe). Gre za bolj grob sediment s pomembnim deležem peskov (0,06 do 2 mm), ki so v suspenziji le ob povišanih pretokih; lahko bi jih poimenovali tudi poplavna kalnost, saj se ob spremenjenih hidravličnih pogojih lahko ponovno posedejo in odložijo na dnu reke (ASCE, 2008).

Podrobnejše poznavanje dinamike rečnih sedimentov je zelo pomembno za razlago spreminjanja zrnavostne sestave rečnih sedimentov vzdolž rečne mreže, ker se večinoma povprečna velikost rečnih sedimentov zmanjšuje, ta pojav običajno imenujemo dolvodna drobnitev (angl. downstream fining). Glavna procesa, ki delujeta, sta rečni obrus (angl. fluvial abrasion; nem. Geschiebeabrieb), ki opisuje procese drobljenja, krhanja, krušenja, brušenja in glajenja rečnih sedimentov (npr. (Mikoš, 1993, 1994)), in rečno sortiranje (angl. fluvial sorting, nem. Flußsortierung), ki je lahko prečno (oblikovanje prodišč na notranjih rečnih zavojih), vzdolžno (izločanje in zastajanje bolj grobih rečnih sedimentov zaradi manjše moči rečnega toka v dolvodni smeri ob zmanjševanju padca rečne struge) ali navpično (posedanje sedimentnih delcev iz vodnega toka). Kalnost in procesi posedanja sedimentnih delcev so torej pomemben del fluvialnega sortiranja in zato vredni podrobnejšega preučevanja.

Za popolnost obravnave še povejmo, da rečna voda premešča tudi raztopljene snovi (angleško *dissolved matter*; nemško *gelöstes Material*), ki so prav tako del erozijsko-sedimentacijskega kroženja snovi na Zemlji. Pogosto rečna voda plavi s seboj tudi razno plavje, predvsem prevladuje lesno plavje (angleško *floating wooden debris*; nemško *Schwemmholz*) organskega izvora – drevesna debla, panji, vejevje in listje. Na vodni površini se premeščajo tudi druge vrste anorganskega plavja, v glavnem gre za odpadke (smeti).

V slovenskih rekah z izrazito hudourniško naravo je kalnost izrazita predvsem v času poplav, saj so ob nizkih pretokih reke večinoma zelo bistre, kalnost je majhna in prevladuje poplavna kalnost (lebdeče plavine, torej drobni del rinjenih plavin, ki je zaradi hidravličnih razmer ob poplavi prešel v suspendirano stanje). Kalnost je bila v slovenskih rekah v preteklosti večja zaradi vnosa antropogenih snovi (separacije premoga, spiranje odlagališč različnih industrijskih odpadkov oziroma jalovišč, premajhno čiščenje industrijskih in komunalnih odpadnih voda; za prikaz razmer na reki Savi glej npr. (Mikoš, 2000)). Z višanjem okoljskih standardov, vpeljavo evropskega načela iz Direktive o okoljski odgovornosti (Direktiva, 2004), da za onesnaženje plača onesnaževalec, smo bistveno zmanjšali vnos antropogenih snovi v rečni sistem. Posledično se je izboljšala kakovost slovenskih rek in ob tem tudi zmanjšala antropogeno povzročena kalnost.

2 • PREGLED ENAČB ZA OCENO HITROSTI POSEDANJA SUSPENDIRANIH DELCEV

Obravnavo kalnosti v rečnih tokovih začenjamo s prikazom zakonitosti posedanja suspendiranih mineralnih delcev v mirujoči tekočini, ob predpostavki, da je koncentracija suspenzije dovolj nizka, da se delci posedajo neovirano, torej pri obravnavi ne upoštevamo medsebojnih vplivov med delci. V teoriji sedimentacije nevezanih (nekohezivnih) delcev (velikosti melja in peska) namreč lahko ločimo med posedanjem (Sansalone, 2009):

- vrste I: ločeno posedanje (angl. discrete settling) v razredčeni suspenziji z minimalno interakcijo med delci;
- vrste II: posedanje kosmičev (angl. *flocculant settling*; angl. *nondiscrete settling*) v koncentrirani suspenziji z vplivom koncentracije suspenzije in medsebojnega delovanja delcev enega na drugega na njihovo hitrost posedanja;
- vrste III: oteženo posedanje (angl. hindered settling) v visoko koncentrirani suspenziji.

V nadaljnji razpravi o rečni kalnosti se bomo torej omejili na neovirano ločeno posedanje vrste I. Model za enakomerno sedimentacijo posameznega delca v newtonski tekočini je ravnovesje sil, ki delujejo nanj. V ravnovesju sta težnostna sila, zmanjšana za vzgon (teža izpodrinjene tekočine = statični vzgon), in dinamična sila upora zaradi trenja med delcem in tekočino, kar zapišemo brez upoštevanja popravkov zaradi oblike delca (predpostavimo sferično obliko) kot:

$$(s-1)\rho g \frac{\pi}{6} d^3 = \frac{1}{2}\rho C_D \frac{\pi}{4} d^2 w_s^2 \tag{1}$$

kjer je *s* (-) relativna gostota sedimentnih delcev, določena kot $s = \rho_s / \rho$; ρ_s (kg/m³) in ρ (kg/m³) sta gostota sedimentnih delcev in gostota tekočine, *g* (= 9,81 m/s²) je pospešek sile teže, *d* (m) je premer sedimentnih delcev, C_D (-) je koeficient upora in w_s (m/s) je hitrost posedanja (angl. *settling velocity*). Iz enačbe (1) lahko izrazimo brezdimenzijsko hitrost posedanja kot:

$$w_* = \frac{w_s}{\sqrt{(s-1)gd}} = \sqrt{\frac{4}{3C_D}}$$
 (2)

V enačbi (2) je koeficient upora C_D odvisen od zrnavostnega Reynoldsovega števila Re_{dr} ki je določeno z razmerjem med vztrajnostnimi in viskoznimi silami na delec v tekočini oziroma določa razmerje med viskoznim (linearnim) uporom pri laminarnem toku tekočine in dinamičnim (kvadratnim) uporom pri turbulentnem toku tekočine:

$$Re_d = \frac{w_s d}{v} = 4 w_* S_* \tag{3}$$

kjer je v ($\approx 1 \ 10^6 \ m^2 s^{-1}$) kinematična viskoznost tekočine, v splošnem odvisna od temperature tekočine, in *S*. (-) je brezdimenzijski sedimentacijski parameter, ki sta ga vpeljala Madsen in Grant (1976) kot:

$$S_* = \frac{d}{4\nu}\sqrt{(s-1)gd} \tag{4}$$

Ko je Stokes (1851) rešil Navier-Stokesovo enačbo za tok tekočine, je tudi teoretično določil koeficient upora za sferične delce v viskozni tekočini ($Re_d < 1$) v odvisnosti od zrnavostnega Reynoldsovega števila Re_d :

$$C_D = \frac{24}{Re_d} \tag{5}$$

in tako za viskozni (linearni) upor določil svoj, tj. Stokesov zakon za določitev končne hitrosti posedanja (angleško *terminal settling velocity*) v viskozni tekočini:

$$w_{s} = \sqrt{(s-1)gd} \sqrt{\frac{4}{3C_{D}}} = \sqrt{(s-1)gd} \sqrt{\frac{4Re_{d}}{324}} = \sqrt{(s-1)gd} \sqrt{\frac{w_{s}d}{18v}}$$

in $w_{s} = \frac{(s-1)gd^{2}}{18v}$ (6)

Za primer uporabe Stokesovega zakona določimo najmanjšo velikost mineralnih delcev kremena relativne gostote s = 2,65, ki se posedejo v 30 minutah na dno 5 m globoke mirujoče vode (predpostavimo kinematično viskoznost vode 10⁻⁶ m²s⁻¹):

$$w_s = \frac{(s-1)gd^2}{18\nu} = \frac{5m}{30\,60\,s} = 2,78\,mm\,s^{-1} \tag{7}$$

$$d = \sqrt[2]{\frac{18 \, v \, w_s}{(s-1)g}} = \sqrt[2]{\frac{18 \, 10^{-6} \, 2,78 \, 10^{-3}}{(2,65-1) \, 9,81}} = 0,056 \, mm \tag{8}$$

Preverimo še zrnavostno Reynoldsovo število:

$$Re_{d} = \frac{w_{s}d}{v} = \frac{2,78\ 10^{-3}\ ms^{-1}\ 0,056\ 10^{-3}\ m}{10^{-6}\ m^{2}s^{-1}} = 0,156$$
(9)

in pogoj veljavnosti Stokesovega zakona je izpolnjen (*Re_d* < 1,0). Izračunajmo še brezdimenzijski sedimentacijski parameter:

$$S_* = \frac{d}{4\nu} \sqrt{(s-1)gd} = \frac{0.056 \ 10^{-3}m}{4 \ 10^{-6} \ m^2 s^{-1}}$$

$$\sqrt{(2,65-1) \ 9,81ms^{-2} \ 0,056 \ 10^{-3}m} = 0,4215 \tag{10}$$

in brezdimenzijsko hitrost posedanja:

$$w_* = \frac{w_s}{\sqrt{(s-1)gd}} = \frac{2,78 \ 10^{-3} m s^{-1}}{\sqrt{(2,65-1)} \ 9,81 m s^{-2} \ 0,056 \ 10^{-3} m} = 0,0923$$

ali $w_s = \frac{S_*}{4,5} = 0,0937$ (11)

Stokesova enačba je torej dober približek le za drobne sedimente (območje gline in melja, torej do velikosti 0,06 mm), pri večjih sedimentnih delcih pa daje previsoke vrednosti, zato se v praksi pogosto uporablja korekcija v obliki Heywoodovih preglednic (glej npr. (F&S. com, 2012)), ki je bila razvita za delce kroglaste oblike in temelji na empirični povezavi med zrnavostnim Reynoldsovim številom Re_d in oblikovnim uporom delca C_D ter velja za vsa zrnavostna Reynoldsova števila. Stokesov zakon daje previsoke vrednosti tudi za zelo majhne delce (manjše od 0,002 mm), ker se začnejo gibati v suspenziji kot Brownovo gibanje – v praksi se delci velikosti 0,001 mm zelo težko posedajo, razen če pride do kosmičenja posedanja kosmičev. Gre za problematiko kakovosti rečne vode (smo v območju velikosti mikrobov) in ne za analizo kalnosti, saj tako majhni delci ne prispevajo veliko h koncentracijam suspendiranih snovi v rečni vodi in s tem k masnemu toku.

Izmed starejših empiričnih enačb navedimo tukaj še Rubeyjevo enačbo (1933), ki je hitrost posedanja suspendiranih delcev (v mm/s) določil eksperimentalno kot:

$$w_s = \frac{6.6}{d} \left[(247,47 \ d^3 + 1)^{0.5} - 1 \right] \text{ (mm/s)}$$
 (12)

kjer je d (v mm) premer suspendiranih delcev. Primerjavo med Rubeyjevo in Stokesovo enačbo podajamo v preglednici 1. Na območju peska daje Rubeyjeva enačba mnogo nižje hitrosti posedanja kot Stokesova enačba in je bližje korekciji po Heywoodu.

Frakcija lebdečih plavin	Srednji premer frakcije (mm)	Hitrost posedanja po Stokesu (6) (mm/s)	Hitrost posedanja po Rubeyju (12) (mm/s)	Hitrost plav- ljenja po Kresserju (14) (m/s)
grobi pesek (0,6–2 mm)	1,3	(1520; + 667 %) 198*	113	2,66
srednji pesek (0,2-0,6 mm)	0,4	(144; + 142 %) 59,4*	51,2	1,46
drobni pesek (0,06–0,2 mm)	0,13	(15,2; + 20,2 %) 12,6*	12,3	0,84
grobi melj (0,02–0,06 mm)	0,04	1,44	1,30	0,46
srednji melj (0,006-0,02 mm)	0,013	0,152	0,138	0,27
drobni melj (0,002–0,006 mm)	0,004	0,0144	0,0131	0,15

 Vrednosti so izračunane z uporabo Heywoodovih preglednic (vrednosti v oklepajih so rezultati po Stokesovi enačbi).

 Preglednica 1 • Hitrosti posedanja po Stokesovi enačbi (6) s korekcijo po Heywoodovih tablicah za peščene frakcije (F&S.com, 2012) in odvisnost hitrosti plavljenja po enačbi Kresserja (14) (za plavljenje je upoštevan maksimalni premer frakcije in za posedanje srednji premer frakcije, viskoznost vode je privzeta pri 20 °C, in sicer 1,002 10⁶ m²s⁻¹ in relativna gostota plavin s = 2,65)

Pri majhnih vrednostih zrnavostnega Reynoldsovega števila je gibanje tekočine okoli sedimentnega delca laminarno ($Re_d < 1$) in tekočina popolnoma obleplja delec. Pri višanju vrednosti Re_d pa se začne za delcem oblikovati vse večji vrtinec, ki povzroča dodatni turbulentni upor tekočine med gibanjem (posedanjem) delca. Za visoke vrednosti zrnavostnega Reynoldsovega števila ($Re_d > 1000$) je gibanje povsem turbulentno in viskozni upor zanemarljiv (npr. (Kladnik, 1979)). V tem območju ($10^3 < Re_d < 3 \ 10^5$) upor tekočine, ki ga občuti delec med posedanjem, izrazimo s kvadratnim zakonom upora, kjer je koeficient upora C_{D} približno konstanten ($\approx 0,4$). V vmesnem prehodnem območju med laminarnim in turbulentnim tokom je koeficient upora teoretično nedoločljiv, sestavljen je iz viskoznega in dinamičnega upora ter se zato običajno določi eksperimentalno v obliki odvisnosti $C_D = f(Re_d)$. Na hitrost posedanja ne vplivajo le velikost delca, njegova gostota in fizikalne lastnosti tekočine, temveč tudi oblika delca in vpliv površinske hrapavosti delca. Zato so se po Stokesovi enačbi številni raziskovalci lotili eksperimentalnega določanja odvisnosti koeficienta upora C_p od zrnavostnega Reynoldsovega števila Rea

Jimenez in Madsen (2003) sta za to prehodno območje določila mejne hitrosti posedanja sferičnih delcev kot:

$$w_* = \begin{cases} S_*/4,5 & S_* < 1\\ 1,83 & 150 < S_* < 4 \cdot 10^5 \end{cases}$$
(13)

Če zapišemo ti dve območji za sferične sedimentne delce iz kremena (s = 2,65), dobimo izraza:

- a. za veljavnost Stokesovega zakona ($S_{\star} < 1$) izraz $d \le \approx 0,1$ mm;
- b. za veljavnost konstantnega oblikovnega koeficienta upora $C_D \approx 0.4$ (150 < $S_* < 4 \cdot 10^5$) izraz $\approx 3 \text{ mm} < d < \approx 120 \text{ mm}.$

Z enačbo (13) smo zapisali, da za sedimentne delce od ≈ 3 mm do ≈ 120 mm poznamo koeficient upora $C_D (\approx 0,4)$ in tudi brezdimenzijsko hitrost posedanja teh delcev (w. = 1,83). Tako se pred nas postavi vprašanje, ali je v rečnem okolju sploh mogoče pričakovati, da bodo sedimentni delci intervala 3–120 mm v suspendiranem stanju in bo za nas poznavanje njihove hitrosti posedanja sploh nujno. Zato si moramo zdaj pogledati naslednji pomemben inženirski parameter kalnosti, to je mejna hitrost rečne vode, pri kateri prehajajo mineralni delci iz rečnega dna v suspenzijo (prehod iz rinjenega v lebdeče gibanje). Gre torej za vprašanje največje velikosti delcev, ki pri znani srednji pretočni hitrosti rečne vode še tvorijo poplavno kalnost. Za obravnavo naj zadošča pogosto uporabljena enačba iz inženirske prakse, tj. Kresserjeva enačba (1964), razvito na osnovi njegovih raziskav na avstrijskih rekah:

$$\frac{v_m^2}{g \, d_m} = 360$$
 (-) (14)

kjer je v_m (m/s) srednja hitrost rečne vode v prečnem prerezu reke, kjer določamo maksimalno velikost plavljenih delcev, $g (\approx 9.81 \text{ m/s}^2)$ je zemeljski pospešek in d_m (m) je mejni premer suspendiranega delca, ki je še v suspenziji, večji delci potonejo na dno in se premeščajo kot rinjene plavine. Hitrosti plavljenja po Kresserjevi enačbi za izbrane frakcije suspendiranih sedimentov (lebdečih plavin) prikazujemo v prealednici 1 in grafično na sliki 1. Iz izračunanih vrednosti sledi, da lahko ob povišanih pretokih (ob poplavah), ko so značilne srednje pretočne hitrosti v rekah tudi višje od 3 m/s, v suspendiranem stanju tudi sedimenti velikosti 2–3 mm (grobi pesek-drobni gramoz). Ta meja pa ustreza začetku veljavnosti dinamičnega (kvadratnega) zakona uporu, kjer je vrednost koeficienta upora C_p znana (\approx 0,4). V naravnem rečnem (fluvialnem) okolju se torej celotna peščena frakcija sedimentnih delcev (0,06 mm-2 mm) niti ne obnaša po Stokesovem zakonu (upoštevamo samo viskozni upor) niti ni upor toku konstanten (upoštevamo le turbulentni upor). Peščena frakcija, ki je podvržena sedimentaciji v rečnem toku v prehodnem režimu med viskoznim in turbulentnim tokom, je posebno pomembna za rečno morfologijo, saj je lahko nenadno izločanje peščene frakcije iz suspenzije vzrok za prehod iz prodonosne v peskonosno reko – prevladujoča frakcija rečnega sedimenta postane pesek in ne več prod: 2-60 mm (Sambrook Smith, 1995). Tak prehod se zgodi recimo na reki Savi na odseku pod Zagrebom, ko se srednje aritmetično zrno nenadoma iz območja 10-40 mm, ki ga ima reka Sava na skoraj celotnem toku od izvira v Sloveniji do Zagreba, zniža na območje nekaj mm.



Slika 1 • Hitrost plavljenja po Kresserju (1964) in odvisnost hitrosti posedanja sedimentnih delcev od velikosti delcev po izbranih 4 metodah

Tako so se v zadnjih desetletjih in letih za prehodno območje med laminarnim in turbulentnim tokom (1 < Re_d < 1000) razvile številne nove metode določanja hitrosti posedanja mineralnih delcev, obsežni pregled klasičnih pristopov je mogoče najti v klasičnih delih s področja rečne mehanike in dinamike (npr. (Yalin, 1977), (van Rijn, 1989), (Raudkivi, 1990)). Različne oblike predlaganih odvisnosti koeficienta upora C_D od Reynoldsovega števila Red je posplošil Cheng (1997) v naslednji obliki:

$$C_d = \left[\left(\frac{M}{Re_d}\right)^{1/n} + N^{1/n} \right]^n \tag{15}$$

kjer so *M, N* in *n* brezdimenzijski koeficienti. Vrednosti treh koeficientov v enačbi (15) za sedimentne delce, obrušene v naravnem rečnem (fluvialnem) okolju, sta za različne raziskovalce zbrala in prikazal Wu in Wang (2006; glej preglednico 2).

Enačba in parameter	Rubey (1933)	van Rijn (1989)	Raudkivi (1990)	Julien (1995)	Cheng (1997)
М	24	24	32	24	32
N	2,1	1,1	1,2	1,5	1
n	1	1	1	1	1,5

Preglednica 2 • Vrednosti eksperimentalnih koeficientov *M*, *N* in *n* iz enačbe (15) – povzeto po Wu in Wang, 2006

Razlike med vrednostmi koeficientov, prikazane v preglednici 2, v določeni meri sledijo iz različne oblike (angl. *shape*) naravnih sedimentnih delcev, ki so bili uporabljeni v eksperimentih. Zato moramo pri odvisnosti koeficienta upora C_d od zrnavostnega Reynoldsovega števila Re_d za naravne sedimente upoštevati dejstvo, da v splošnem delci niso kroglaste oblike, in zato kot dodatni parameter upoštevati obliko delcev. Če predpostavimo kot najbolj primerno obliko delcev elipsoidasto obliko, se pogosto uporablja Coreyjev (1949) oblikovni koeficient:

$$S_f = \frac{c}{\sqrt{ab}} \tag{16}$$

kjer so *c*, *b* in *a* najdaljša, srednja in najkrajša os elipsoida. Za kroglo je $S_r = 1$ in teoretično za dvodimenzijsko ploščico poljubne oblike velja $S_r = 0$. Nadalje se pri eksperimentalnem odnosu $C_d = f(Re)$ poleg koeficienta oblike S_r uporablja še zaobljenost delcev *P*, ki ga običajno ocenjujemo iz maksimalnega obrisa delca, projiciranega v ravnino maksimalne osi delca (ravnina, ki je pravokotna na najkrajšo os delca), in vrisane krožnice v ta obris. Vidimo, da je za zelo natančno oceno hitrosti posedanja mineralnih sedimentnih delcev nujno poznati ne le njihovo zrnavostno sestavo (velikost), temveč tudi obliko delcev.

Jiménez in Madsen (2003) sta na osnovi eksperimentalnih poskusov z znanimi vrednostmi za obliko delcev predlagala odvisnost:

$$w_* = \frac{w_S}{\sqrt{(s-1)gd_N}} = \left(A + \frac{B}{S_*}\right)^{-1}$$
(17)

$$S_* = \frac{d_N}{4\nu} \sqrt{(s-1)gd_N} \tag{18}$$

kjer je d_N nominalni diameter delcev (= $d_s/0.9$, če so delci določeni s sejalno analizo in je d_s premer sita), koeficienta A in B pa sta avtorja podala grafično v odvisnosti od Coreyjevega oblikovnega koeficienta S_r in Powersovega koeficienta zaobljenosti P. Za primer kremenčevega peska (s = 2,65) z značilnimi vrednostmi $S_r = 0,7$ in P = 3,5, kar določi vrednosti koeficientov A = 0,954 in B = 5,12.

Wu in Wang (2006) sta opravila obsežno analizo enačb za oceno hitrosti posedanja. Izhajala sta iz Changove splošne opredelitve odvisnosti med koeficientom upora C_d in zrnavostnim Reynoldsovim številom Re_d iz enačbe (15) in jo vnesla v enačbo (2) za brezdimenzijsko hitrost posedanja:

$$w_* = \frac{w_S}{\sqrt{(s-1)gd}} = \sqrt{\frac{4}{3C_D}}$$
(2)

ter predlagala splošno obliko za hitrost posedanja:

$$w_{s} = \frac{M \nu}{N d} \left[\sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{4 N}{3 M^{2}} D_{*}^{3}\right)^{1/n}} - \frac{1}{2} \right]^{n}$$
(19)

in

$$D_* = d \left[\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3}$$
(20)

kjer je *d* nominalni premer sedimentnih delcev. Da bi olajšala uporabo in odpravila grafične prikaze pomembnih parametrov, sta analizirala razpoložljive eksperimentalne podatke iz literature in predlagala v skladu z enačbo Changa (15) za 3 parametre v enačbi (19) naslednje kalibrirane vrednosti (Wu in Wang, 2006):

$$M = 53.5 \ e^{-0.65 \ S_f} \tag{21}$$

$$N = 5,65 \ e^{-2,5 \ S_f} \tag{22}$$

$$n = 0.7 + 0.9 S_f \tag{23}$$

Predlagane enačbe (19) do (23) naj bi dajale boljše rezultate od drugih klasičnih pristopov (npr. (Interagency Committee, 1957)). Kadar podrobne vrednosti koeficientov oblike naravnih sedimentnih delcev niso znane (zamudno določanje), Wu in Wang predlagata, da se uporabijo njune enačbe ob predpostavki, da je Coreyjev oblikovni koeficient $S_r = 0,7$, in uporabi v njunih enačbah vrednosti: M = 33,9, N = 0,98 in n = 1,33. Potek hitrosti posedanja po enačbah Wuja in Wanga (2006) smo prikazali za sferične delce ($S_r = 1,0$) na sliki 1 in za peščeno frakcijo in 4 različne oblike delcev še posebej na sliki 2.



Slika 2 • Vpliv oblike sedimentnih delcev na hitrost posedanja po Wuju in Wangu (2006); za primerjavo so prikazane še Fergusonova in Churchova enačba (2004) za delno zaobljene delce ter Stokesova (1851) in Rubeyjeva (1933) enačba

Poenostavitev Dietrichove enačbe (1982) sta predlagala Ferguson in Church (2004):

$$w_{s} = \frac{(s-1)gd^{2}}{C_{1}\nu + \sqrt{0.75}C_{2}(s-1)gd^{3}}$$
(24)

kjer parametra C_1 in C_2 opisujeta obliko in teksturo delcev (preglednica 3). Za naravna peščena zrna, ki jim premer d določimo s sejalno analizo, avtorja predlagata vrednosti $C_1 = 18$ in $C_2 = 1,0$, če dodamo še pogoj, da gre za kremenova zrna (s = 2,65), se enačba (24) poenostavi v:

$$w_s = \frac{1.65 \, g d^2}{18\nu + \sqrt{1.2375 g d^3}} \tag{25}$$

opis delcev	C ,	C 2
popolnoma ostrorobi delci		1,2
delno zaobljeni delci (premer prostorninsko ekvivalentnega delca)		1.1
delno zaobljeni delci (premer delcev določen s sejalno analizo)	18	1,0
gladka krogla	18	0,4

Preglednica 3 • Vrednosti parametrov C, in C₂ v enačbi Fergusona in Churcha (2004)

Predlagana enačba se približuje Stokesovi enačbi (1851) za zelo drobne sferične delce in konstantnemu koeficientu upora za zelo velike delce (slika 2). Kljub poenostavljenemu izrazu za glavne parametre delcev (velikost, gostota, oblika, zaobljenost, tekstura) omogoča v primeru heterogene sestave sedimentirajočih delcev dobre rezultate in obenem ne zahteva zamudnega in včasih zelo zahtevnega določanja zaobljenosti in hrapavosti posameznih delcev.

3 • VERTIKALNA PORAZDELITEV SUSPENDIRANIH SNOVI V TURBULENTNEM TOKU

Kakšne so možne oblike vertikalne porazdelitve koncentracij suspendiranih sedimentov v tipični vertikali reke?

Pri izpeljavi enačbe za vertikalno porazdelitev lebdečih plavin izhajamo iz splošne difuzijske enačbe. Zamislimo si ravninski element površine dF v globini z nad dnom (z = 0 označuje dno reke), skozi katero se v ravnovesnih razmerah dviguje in spušča enaka količina lebdečih plavin. Tako lahko za ravnovesne razmere za ta ravninski element zapišemo:

$$c w_s = -\varepsilon_s \frac{dc}{dz} \quad (m/s) \tag{26}$$

kjer je z (m) relativna višina nad dnom, c (-) je koncentracija lebdečih plavin, w_s (m/s) je hitrost usedanja suspendiranih delcev in ε_s (m²/s) je difuzijski koeficient. Če predpostavimo porazdelitev strižnih napetosti v reki, kot sledi:

$$\tau(z) = \rho \,\varepsilon_m \,\frac{dv}{dz} = \tau_0 \,\left(1 - \frac{z}{h}\right) \,\left(\text{N/m}^2\right) \tag{27}$$

$$\frac{dv}{dz} = \frac{v_*}{\kappa z} \quad (-/s) \tag{28}$$

kjer je ε_m (m²/s) koeficient turbulentne izmenjave, v- (m/s) je strižna hitrost, ρ (1000 kg/m³) je gostota vode in κ (pogosto privzeta kot konstanta: $\kappa = 0,4$) je von Karmanova konstanta. Ob predpostavki, da sta koeficienta difuzije in turbulentne izmenjave enaka ($\varepsilon_s = \varepsilon_m$), se enačbe (26) do (28) zapišejo v obliki:

$$c w = -v_* \kappa z \left(1 - \frac{z}{h}\right) \frac{dc}{dz} \quad (m/s)$$
⁽²⁹⁾

oziroma preoblikovano, da ločeno zapišemo spremenljivke:

$$\frac{dc}{c} = -\frac{w_s}{v_* \kappa z \left(1 - \frac{z}{h}\right)} dz \quad (-)$$
(30)

Nedoločni integral (30) lahko ob poznavanju koncentracije lebdečih plavin c_a v točki z = a zapišemo v določni obliki:

$$\int_{c_a}^{c} \frac{dc}{c} = -\frac{w_s}{v_*\kappa} \int_a^z \frac{h}{z(z-h)} dz \quad (-)$$
(31)

in ob upoštevanju robnih pogojev dobimo rešitev integralnega zapisa kot:

$$ln\frac{c}{c_a} = \frac{w_s}{v_*\kappa} ln\frac{h-z}{z}\frac{a}{h-a} \quad (-) \tag{32}$$

oziroma:

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a}\right)^{\frac{W_s}{W_s \kappa}} \quad (-) \tag{33}$$

Izraz (33) nato uporabimo tako, da integriramo zmnožek *c v* in tako dobimo pretok lebdečih plavin Q_s . Koncentracija lebdečih plavin »blizu dna« c_a je pri tem odvisna od pretoka rinjenih plavin. Ob razviti prodonosnosti lahko pričakujemo, da je prehajanje drobnih rinjenih plavin v poskakovanje (saltacija) in v lebdeče (suspendirano) stanje najbolj intenzivno prav ob dnu reke. Koncentracija *c* in hitrost vode *v* se seveda spreminjata z relativno višino *z*: torej velja *c*(*z*) in *v*(*z*), kar je treba upoštevati pri izračunu pretoka lebdečih plavin. Koncentracija c_a je lahko tudi izmerjena vrednost, potem sloni ocena ali račun specifičnega pretoka lebdečih plavin q_s na teh merjenih vrednosti. Več izmerjenih vrednosti koncentracij lebdečih plavin blizu dna c_a omogoča kontrolo izračuna. Podrobnejša obravnava presega okvir tega prispevka in je odvisna od načina, kako določamo koncentracijo in zrnavost suspendiranih snovi v rečnem toku.



Slika 3 • Vertikalna porazdelitev koncentracije lebdečih plavin (levo za drobne in desno za grobe suspendirane sedimente)

– konceptualni prikaz

Izraz v eksponentu na desni strani v enačbi (33) je brezdimenzijski Rousov parameter (1937):

$$P = \frac{w_s}{\kappa v_*} \tag{34}$$

ki je dejansko parameter načina premeščanja rečnih sedimentov (meje so približne):

- P > 7,5 delec miruje na rečnem dnu,
- P = 7,5 delec se začne premikati po dnu kot rinjena plavina,
- 2,5 < P < 7,5 delec je rinjena plavina,
 - P = 2,5 delec občasno poskakuje in prehaja v suspendirano stanje,
 - P < 1,2 delec je lebdeča plavina.

Ob znani vrednosti Rousovega števila < 1,2 je oblika vertikalne porazdelitve koncentracije suspendiranih delcev v rečnem toku odvisna od razmerja med hitrostjo posedanja in strižno hitrostjo:

- hitrost posedanja lebdečih plavin w_s je precej manjša od strižne hitrosti v., Rousov parameter ima nizko vrednost (P « 1) in vertikalna porazdelitev koncentracije lebdečih plavin je približno enakomerna po celotni globini reke (slika 3 levo, tipično za naravno kalnost),
- hitrost posedanja lebdečih plavin w_s je približno enaka strižni hitrosti $v \cdot (w_s \sim v \cdot)$, Rousov parameter P ima vrednost blizu 1,0 in vertikalna porazdelitev koncentracije lebdečih plavin je zelo neenakomerna v spodnjih plasteh reke blizu dna je precej večja kot na vodni gladini (slika 3 desno, značilno za poplavno kalnost neenakomerne zrnavosti).

Omenjena vrednost P < 1,2 ustreza tudi Bagnoldovemu pogoju za prehod v suspendirano stanje (1966):

$$M = \frac{v_*}{w_s} \ge 1 \tag{35}$$

kjer je v_{\cdot} (m/s) strižna hitrost in w_s (m/s) hitrost usedanja suspendiranih delcev.

4 • SKLEP

Podrobnejše poznavanje dinamike rečnih sedimentov je zelo pomembno za razlago spreminjanja zrnavostne sestave rečnih sedimentov vzdolž rečne mreže. Pomemben element rečne dinamike je kalnost, ki je bila osrednja tematika tega prispevka. Pri obravnavi rečne kalnosti smo se usmerili v prikaz enačb za oceno hitrosti posedanja posameznih sedimentnih delcev v pogojih ločenega posedanja. Prikazali smo nekatere klasične enačbe, predvsem Stokesovo enačbo, ki velja za viskozni upor in s tem za majhne sedimentne delce. Za rečno kalnost so pomembnejši delci meljaste in peščene frakcije, ki se posedajo v prehodnem režimu, kjer Stokesova enačba ne daje zadovoljivih rezultatov. Zato smo iz svetovne literature povzeli nekatere novejše enačbe za oceno hitrosti posedanja sedimentnih delcev, ki upoštevajo poleg velikosti in gostote delcev tudi njihovo obliko in teksturo (površinsko hrapavost). Za enačbo Jiméneza in Madsna (2003) ter Wuja in Wanga (2006) je nujno opraviti zamudne analize oblike sedimentnih delcev, pri enačbi Fergusona in Churcha (2004) pa lahko uporabimo predlagane vrednosti empirično določenih koeficientov. Omenjene enačbe smo nadgradili s prikazom enačbe za vertikalno porazdelitev koncentracije suspendiranih snovi (kalnosti) v poljubni vertikali v pretočnem prerezu reke. Prikazane teoretične osnove rečne kalnosti, predvsem vertikalne porazdelitve koncentracije, so nujne za uspešno načrtovanje terenskega vzorčevanje suspendiranih delcev v rečnem toku.

5 • ZAHVALA

Raziskave rečnih sedimentov potekajo na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani v okviru dela pri raziskovalnem programu P2-0180 Hidrotehnika, hidravlika in geotehnika, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Avtor se za sofinanciranje zahvaljuje tudi HSE Investu, d. o. o., iz Maribora.

6 • LITERATURA

ASCE, Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice, Edited by Marcelo Garcia, American Society of Civil Engineers (ASCE) Manuals of Practice št. 110, 1132 str., 2008.

Bagnold, R. A., An approach to the sediment transport problem from general physics, U. S. Geological Survey Professional Paper 422, Washington, D. C., 1966.

Cheng, N. S., Simplified settling velocity formula for sediment particle, Journal of Hydraulic Engineering, letnik 123, št. 2, 149–152, 1997.

Corey, A. T., Influence of shape on the fall velocity of sand grains, Master's thesis, Colorado A&M College, 1949.

Dietrich, W. E., Settling velocity of natural particles, Water Resources Research, letnik 18, št. 6, 1615–1626, 1982.

Direktiva, Direktiva 2004/35/ES Evropskega parlamenta in Sveta z dne 21. aprila 2004 o okoljski odgovornosti v zvezi s preprečevanjem in sanacijo okoljske škode, 2004, povzeto po: <u>http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=DD:15:08:32004L0035:SL:PDF</u>.

F&S.com, Filtration and Separation.com, povzeto po: http://www.filtration-and-separation.com/index.htm, 2012.

- Ferguson, R. I., Church, M., A simple universal equation for grain settling velocity, Journal of Sedimentary Geology, letnik 74, št. 6, 933–937, 2004.
- Interagency Committee, Some fundamentals of particle size analysis: A study of methods used in measurement and analysis of sediment loads in streams, Report No. 12, Subcommittee on Sedimentation, Interagency Committee on Water Resources, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Minneapolis, 1957.
- Jiménez, J. A., Madsen, O. S., A Simple Formula to Estimate Settling Velocity of Natural Sediments, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, letnik 129, št. 70, 70–78, 2003. doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(2003)129:2(70).
- Julien, P. Y., Erosion and deposition, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1995.

Kladnik, R., Osnove fizike – I. del, 3. izdaja, Državna založba Slovenije, Ljubljana, Slovenija, 1979.

Kresser, W., Gedanken zur Geschiebe – und Schwebstoffführung der Gewässer, Österreichische Wasserwirtschaft, letnik 16, št. 1–2, 6–11, 1964.

- Madsen O. S., Grant, W. D., Quantitative description of sediment transport for waves, Proceedings of the 15th Coastal Eng. Conf., ASCE, New York, 1093–1112, 1976.
- Mikoš, M., Fluvial abrasion of gravel sediments, Miteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, št. 123, 322 str., 1993.
- Mikoš, M., Fluvialna abrazija v prodonosnih vodotokih. 1. del, Terensko raziskovanje procesov in njihov matematični opis. Gradbeni vestnik, letnik 43, št. 3/4/5, 68–76, 1994.
- Mikoš, M., Prodna bilanca reke Save od Jesenic do Mokric = Sediment budget of the Sava river from Jesenice to Mokrice. Gradbeni vestnik, letnik 49, št. 9, 208–219, 2000.
- Mikoš, M., Sediment transport. V: LEHR, J.H. (ur.). Water encyclopedia. John Wiley & Sons, 417–421, 2005.
- Mikoš, M., Kranjc, A., Matičič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, M., Veselič, M., Brilly, M., Hidrološko izrazje = Terminology in hydrology. Acta hydrotechnica, letnik 20, št. 32, 3–324, 2002.
- Raudkivi, A. J., Loose boundary hydraulics, 3rd Ed., Pergamon Press, Oxford, U.K., 533 str., 1990.
- Rouse, H., Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence, Transactions ASCE, letnik 102, Paper no. 1965, 463–543, 1937.
- Rubey, W. W., Settling velocity of gravel, sand, and silt particles, American Journal of Science, letnik 25, št. 148, 325–338, 1933.
- Rusjan, S., Mikoš. M., Dinamika premeščanja lebdečih plavin v porečjih = Suspended load transport dynamics in river basins, Acta hydrotechnica, letnik 24, št. 40, 1–20, 2006. ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a40sr.pdf
- Sambrook Smith, G. H., Ferguson, R. I., The gravel-sand transition along river channels, Journal of Sedimentary Research, letnik A65, 423-430.
- Sansalone, S., Lin, H., Ying, G., Experimental and field studies of type I settling for particulate matter transported by urban runoff, Journal of Environmental Engineering, letnik 135, št. 10, 953–963.

Stokes, G. G., Transactions of the Cambridge Philosophical Society 9 (Part II), 8, 1851.

van Rijn, L.C., Handbook: Sediment transport by currents and waves, Report No. H461, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands, 1989.

Yalin, M.S., Mechanics of sediment transport, Pergamon Press, Oxford, U. K., 1977.

Wu, W., Wang, S. S. Y., Formulas for sediment porosity and settling velocity, Journal of Hydraulic Engineering, letnik 132, št. 8, 858–862, 2006.