

4.4 KRETANJE VUČENOG NANOSA

Nanos predstavlja krutu fazu u proračunima tečenja otvorenih vodotoka. Nanos se dijeli na suspendirani i vučeni nanos. Suspendirani nanos sadrži dvije komponente, a to su komponenta tranzitnog i komponenta koritoformirajućeg nanosa. Tranzitni nanos predstavlja dio krute tvari koja se (u smislu značajnog učinka) ne taloži u koritu vodotoka. Komponenta koritoformirajućeg nanosa u suspendiranom nanosu povremeno se taloži, a povremeno kreće u mješavini s vodom. Vučeni nanos je prema definiciji koritoformirajući.

U nastavku ćemo se osvrnuti na problem kretanja vučenog nanosa, jer njegova dinamika znatno utječe na stabilnost korita. Jednadžbe pronosa nanosa baziraju se na različitim temeljima. Ovdje ćemo spomenuti tri pristupa u rješavanju toga problema. To su :

1. Pristup posmičnog naprezanja (DuBoys, Shields, Einstein, Mayer-Peter Muller, Einstein Brown, Parker i dr.)
2. energetski pristup (Engelund Hansen, Ackers White, Yang)
3. parametarski pristup (Colby)

Podjela jednadžbi za proračune pronosa nanosa dijele se, s obzirom na njihovu praktičnu primjenu na:

1. jednadžbe pronosa vučenog nanosa (DuBoys, Shields, Einstein, Mayer-Peter Muller, Einstein Brown, Parker i dr.)
2. jednadžbe pronosa suspendiranog nanosa (Einstein)
3. jednadžbe pronosa materijala dna (koritoformirajućeg nanosa) (Colby, Engelund Hansen, Ackers White, Yang)

Navedeni autori samo su dio niza koji se javlja u literaturi, a „svakodnevno“ se pojavljuju nove inačice i novi postupci, što govori o aktualnosti i ne univerzalnosti dosadašnjih rješenja.

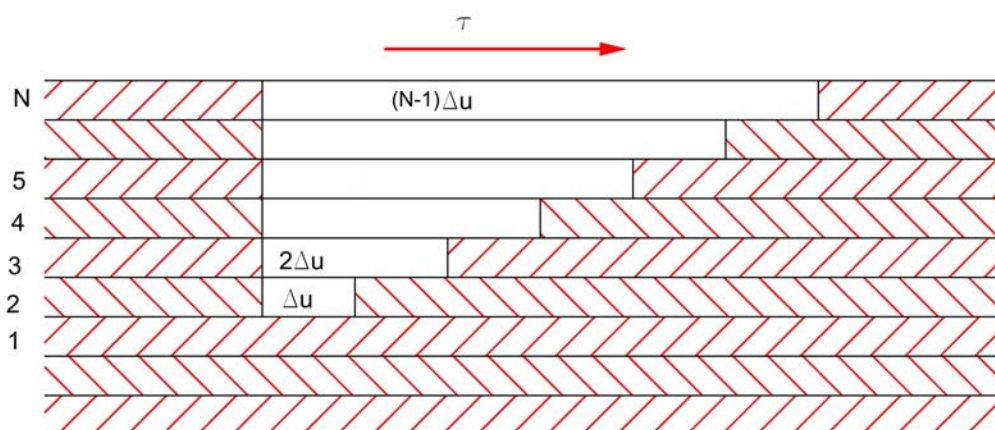
Jednadžbe pronosa vučenog nanosa

DuBoys (1879)

Povijesno gledano radi se o prvoj jednadžbi za proračun pronosa nanosa. Njena velika vrijednost je u pretpostavkama koje je uveo i pristupu rješavanju problema. Jednadžba DuBoysa pretpostavlja da se uniformne čestice vučenog nanosa kreću u slojevima debljine istog reda veličine kao što je i promjer zrna. Brzina kretanja slojeva linearno se smanjuje po dubini (što se kasnije pokazalo kao netočno), a jedinični volumni pronos nanosa q_b dobiva se iz izraza:

$$q_b = \frac{(N-1)\Delta u}{2} N d' \quad [m^3 / m / s] , \quad 4.36$$

Gdje je $(N-1)$ broj aktivnih slojeva koji se pomiču, d' debljina pojedinog sloja, a Δu inkrement brzine između dva sloja. U gornjem izrazu $\frac{(N-1)\Delta u}{2}$ predstavlja srednju brzinu kretanja nanosa, a $N d'$ ukupnu debljinu slojeva, uzimajući i onaj neaktivni gdje je brzina kretanja jednaka nuli.



Slika 4.22 Definicijska skica DuBoysovog postupka

Posmično naprezanje koje se realizira na dnu (τ) je u trenutku pokretanja nanosa izjednačeno sa jediničnom silom trenja između susjednih slojeva. Jedinična sila trenja τ_c između svih slojeva bit će određena uronjenom težinom slojeva $N d' g (\rho_s - \rho)$ i koeficijentom trenja f_s , odnosno:

$$\tau = f_s N d' g (\rho_s - \rho) \quad 4.37$$

S druge strane, do pokretanja nanosa doći će kada se pokrene sloj nanosa na vrhu, odnosno ukoliko je slučaj da je $N=1$. Kritično naprezanje τ_c za početak kretanja bit će tada analogno definirano odnosom:

$$\tau_c = f_s d' g (\rho_s - \rho), \quad 4.38$$

Stoga će odnos između stvarnog naprezanja na dnu i kritičnog naprezanja pri kojem će doći do pokretanja nanosa biti definirano brojem slojeva:

$$\frac{\tau}{\tau_c} = \frac{f_s N d' g (\rho_s - \rho)}{f_s d' g (\rho_s - \rho)} = N. \quad 4.39$$

Zamjenom broja slojeva N u jednadžbi za jedinični pronos nanosa dobit će se:

$$q_b = \frac{(\frac{\tau}{\tau_c} - 1)\Delta u}{2} \frac{\tau}{\tau_c} d' = \frac{d' \Delta u}{2\tau_c^2} \tau (\tau - \tau_c) = C_d \tau (\tau - \tau_c), \quad 4.40$$

Gdje je C_d koeficijent koji ovisi o karakteristikama nanosa. Prema toj jednadžbi DuBoys jediničan pronos nanosa po jedinici širine korita vodotoka proporcionalan je višku tangencijalnog naprezanja $(\tau - \tau_c)$. Taj pristup kasnije su koristili mnogi istraživači.

Odnose za određivanje koeficijenta C_d i kritičnog posmičnog naprezanja τ_c odredio je Straub (1935.):

$$C_d = \frac{0,17}{d^{3/4}} \quad [m^3 / kg / s] \quad 4.41$$

$$\tau_c = 0,5984 + 0,9123 d \quad [N / m^2], \quad 4.42$$

Gdje je d srednji promjer zrna nanosa u mm.

Kretanje vučenog nanosa u šljunčanim koritima

Mehanizam kretanja vučenog nanosa u šljunčanim koritima donekle se razlikuje nago li kod korita s pjeskovitim dnom. Naime kod šljunčanih korita utjecaj forme dna nije toliko dominantan, te je hrapavost dna vezana pretežno uz hrapavost površine. Jasno je da hrapavost utječe na profil brzine tečenja, a poznato je da je posmično naprezanje proporcionalno gradijentu horizontalne komponente brzine:

$$\tau_0 = \mu \frac{du}{dz} \quad [N / m^2] \quad 4.43$$

Gradijent horizontalne komponente brzine (nagib tangente na vertikalni profil brzine) ovisi o hrapavosti dna. Kod šljunčanih korita hrapavost je moguće odrediti u funkciji promjera zrna čestice, za što postoji niz obrazaca raznih autora, a ovdje ćemo citirati obrazac koji je odredio Bray:

$$\frac{1}{f^{1/2}} = 1,36 \left(\frac{D}{d_{50}} \right)^{0,281} \quad 4.44$$

Gdje je D dubina vode, a f koeficijent hrapavosti prema Darcy-Weisbachovoj formuli:

$$f = \frac{4\tau_0}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad 4.45$$

Ako u gornju jednadžbu uvedemo izraz za prosječno posmično naprezanje:

$$\tau_0 = \rho g R I, \quad 4.46$$

Možemo izvesti da je brzina toka v jednaka:

$$v = \left(\frac{8gRI}{f} \right)^{1/2} \quad 4.47$$

Spomenuta jednadžba za određivanje koeficijenta hrapavosti pokazala je najbolje poklapanje u istraživanju koje je proveo Chang (1980). On je razvio racionalnu metodu za pronos nanosa u šljunčanim koritima, uz pretpostavku trapeznog korita vodotoka s pokretnim dnom i nepokretnim obalama. Za šljunčana korita srednjeg promjera zrna koji prelazi 16 mm nanos predstavlja uglavnom vučeni nanos. Razni istraživači su za takove uvjete tražili funkcijsku vezu između Shieldsovog broja i intenziteta pronosa nanosa (drugi i treći član iz jednadžbe 4.22). Parker (1979) je došao, temeljem istraživanja na seriji od više od 6000 podataka do odnosa:

$$\Phi = 11,2 \left(\frac{1}{\Psi} - 0,03 \right)^{4/5} \Psi^3 \quad 4.48$$

Gdje je

$$\frac{1}{\Psi} = \frac{\tau_0}{g(\rho_s - \rho)d} \quad 4.49$$

Shieldsov broj, a

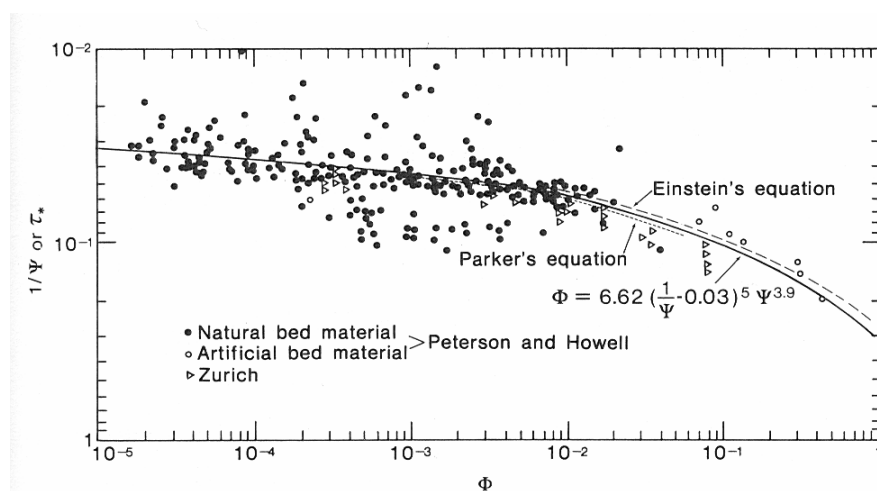
$$\Phi = \frac{q_v}{\sqrt{g\Delta d^3}} \quad 4.50$$

Intenzitet pronosa nanosa.

Changova istraživanja, temeljem podataka Meyer-Peterovih mjerenja u Zurichu na srednjem promjeru zrna od 28,6 mm, dala su nešto drugačiji oblik tog odnosa, odnosno:

$$\Phi = 6,62 \left(\frac{1}{\Psi} - 0,03 \right)^5 \Psi^{3,9} \quad 4.51$$

Grafički prikaz gore spomenutih jednadžbi, u usporedbi s mjerenim vrijednostima dan je na slici 4.23.



Slika 4.23 Zavisnost pronosa vučenog nanosa (Chang)

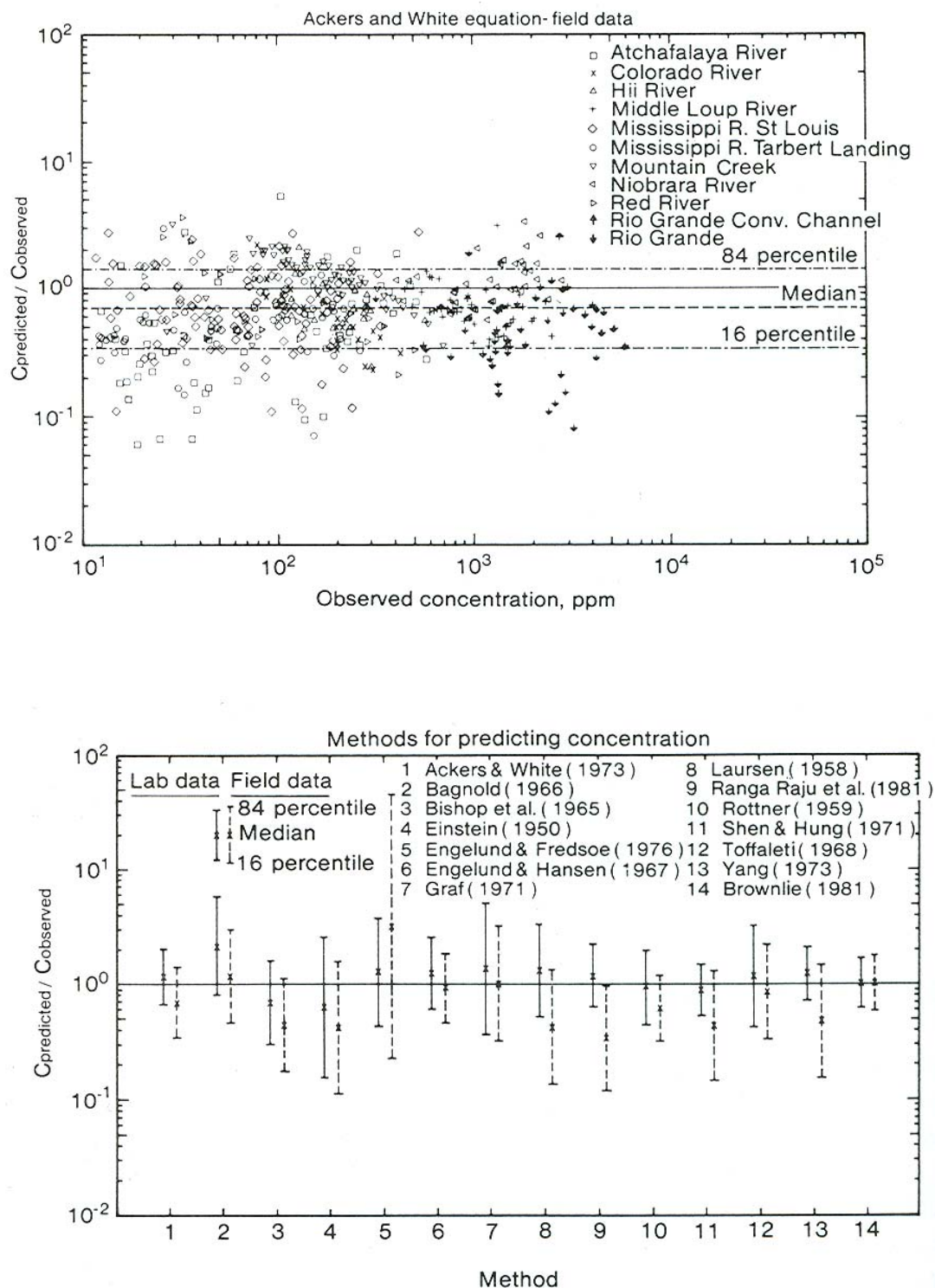
Treba komentirati da je u obadva gore navedena postupka granična vrijednost Shieldsovog parametra pri kojoj dolazi do pokretanja nanosa uzeta 0,03. To znači da na pokretanje nanosa djeluje onaj dio posmičnih naprezanja koji prelazi upravo tu vrijednost, odnosno primijenjen je DuBoysov pristup da je pronos nanosa proporcionalan „višku“ tangencijalnog naprezanja ($\tau - \tau_c$).

Prilikom odabira postupka za procjenu pronosa nanosa treba biti vrlo oprezan. Razlog je u nepouzdanosti i ograničenju vezanih uz neuzimanje svih fizikalnih veličina u obzir i ekstrapolaciji podataka dobivenih na uskom rasponu vrijednosti. U nastavku dan je tablični prikaz raspona ulaznih vrijednosti fizikalnih veličina u istraživanjima za određivanje zakonitosti pronosa nanosa. Već sama činjenica da su neki istraživači mjerili na fizikalnim modelima, a neki u laboratoriju, onemogućava nas u međusobnoj usporedbi. Verifikacija postupaka treba biti provedena na mjerenjima u prirodi.

Izraz	Promjer zrna	Srednji promjer zrna	Specif. gustoća mase zrna (ρ/ρ_v)	Brzina toka vode	Dubina ili hidraulički radijus (R)	Pad linije energije	Širina korita	Temp. vode
	d [mm]	d _m [mm]	s [m ⁰]	V [m/s]	D [m]	I [m/m]	B [m]	T [°C]
Ackers-White (lab.)	0.04 - 7.0		1.0 - 2.7	0.02 - 2.1	0.003 - 0.43	0.00006 - 0.037	0.07 - 1.2	8 - 32
Englund-Hansen (lab.)		0.19 - 0.93		0.2 - 1.9	0.06 - 0.4	0.000055 - 0.019		7 - 34
Laursen (prir.)		0.08 - 0.7		0.02 - 2.4	0.2 - 16,5	0.0000021 - 0.0018	19.2 - 1109	0 - 34
Laursen (lab.)		0.011 - 29		0.2 - 2.9	0.01 - 1.1	0.00025 - 0.025	0.07 - 2.0	8 - 28
Meyer-Peter Muller (lab.)	0.4 - 29		1.25 - 4.0	0.4 - 2.9	0.01 - 1.2	0.0004 - 0.02	0.15 - 2.0	
Tofaletti (prir.)	0.062 - 4.0	0.095 - 0.76		0.2 - 2.4	0.02 - 17.3 (R)	0.000002 - 0.0011	19.2 - 1109	0 - 34
Tofaletti (lab.)	0.062 - 4.0	0.45 - 0.91		0.2 - 1.9	0.02 - 0.33 (R)	0.00014 - 0.019	0.24 - 2.4	4 - 34
Yang (prir.-pijesak)	0.15 - 1.7			0.2 - 2.0	0.01 - 15.2	0.000043 - 0.028	0.13 - 533	0 - 34
Yang (prir.-šljunak)	2.5 - 7.0			0.4 - 1.6	0.02 - 0.22	0.0012 - 0.029	0.13 - 533	0 - 34

Tablica 4.I Prikaz raspona ulaznih vrijednosti fizikalnih veličina u istraživanjima za određivanje zakonitosti pronosa nanosa.

U nastavku je dan prikaz osnovnih rezultata rada Brownliea (1981) koji je uspoređivao rezultate proračuna koncentracije nanosa i mjerenja na modelu i u prirodi. Isto tako je dan rezultat istraživanja Alonsoa (1980). Prikazi su dani kako bi se dobio zoran prikaz nepouzdanosti modela.



Slika 4.24 Usporedba rezultata proračuna koncentracije nanosa i mjerenih veličina za različite postupke

Formula	Number of Tests	Ratio Between Predicted and Measured Load			Standard Deviation	Percentage of Tests with Ratio Between $\frac{1}{2}$ and 2
		Mean	95% Confidence Limits of the Mean			
<i>Field Data</i>						
Ackers–White	40	1.27	1.05	1.48	0.68	87.8
Engelund–Hansen	40	1.46	1.28	1.64	0.56	82.9
Laursen	40	0.65	0.49	0.80	0.48	56.1
MPME	40	0.83	0.50	1.15	1.02	58.5
Yang	40	1.01	0.89	1.13	0.39	92.7
Bagnold	40	0.39	0.31	0.47	0.26	32.0
Meyer-Peter–Muller	40	0.24	0.22	0.27	0.09	0
Yalin	40	2.59	2.08	3.11	1.62	46.3
<i>Flume Data with $D/d \geq 70$</i>						
Ackers–White	177	1.34	1.24	1.54	1.29	73.0
Engelund–Hansen	177	0.73	0.63	0.83	0.68	51.1
Laursen	177	0.81	0.73	0.88	0.51	71.4
MPME	177	3.11	2.95	3.52	2.75	42.1
Yang	177	0.99	0.93	1.08	0.60	79.8
Bagnold	177	0.85	0.81	1.22	2.50	20.8
Meyer-Peter–Muller	177	0.40	0.39	0.47	0.49	18.5
Yalin	177	1.62	1.38	2.23	4.08	32.6
<i>Flume Data with $D/d < 70$</i>						
Ackers–White	48	1.12	0.93	1.28	0.52	89.6
Engelund–Hansen	48	0.75	0.59	0.90	0.50	66.7
Laursen	48	1.04	0.76	1.32	0.99	79.2
MPME	48	1.34	1.04	1.64	1.04	66.7
Yang	48	0.90	0.79	1.05	0.51	85.4
Bagnold	48	1.53	1.46	1.87	1.14	45.8
Meyer-Peter–Muller	48	1.03	1.00	1.27	0.83	72.9
Yalin	48	1.92	1.45	2.41	1.65	64.6

Tablica 4.II Usporedba rezultata proračuna pronosa nanosa i mjerenih veličina za različite postupke