

بررسی آزمایشگاهی و مدل سازی تنش برشی بحرانی برای فرسایش سطحی بستر چسبنده

حسام فولادفر^۱، محمود شفاعی بجزستان^۲، منوچهر فتحی مقدم^۳

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۹۱/۸/۲۳

چکیده

برآورد تنش برشی بحرانی برای فرسایش بستر چسبنده با درجه اطمینان زیاد و به صورت تابعی از میزان تحکیم یافتگی و عمق رسوبات بستر از جمله موارد عمده‌ای در حوزه رسوبات چسبنده می‌باشد که تاکنون روش معینی برای آن ارائه نشده است. در این تحقیق، با این فرض که مقاومت برشی واقعی بستر در نزدیکی سطح مشترک بستر و جریان می‌تواند جایگزین مناسبی برای تنش برشی بحرانی برای فرسایش بستر چسبنده گلی گردد، با روابط مرکلباخ، این متغیر با استفاده از متغیرهای چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب تنش جانبی، ضریب خزش، بعد فرکتالی، ضریب تنش موثر و به صورت تابعی از غلظت حجمی بستر تعریف شده است. این متغیرها را می‌توان به دو دسته متغیرهای مکانیک خاک و متغیرهای مربوط به تحکیم طبقه‌بندی نمود. متغیرهای مکانیک خاک به سادگی قابل سنجش می‌باشند ولی متغیرهای مرتبط با تحکیم خاک، شامل متغیر مربوط به تنش موثر و متغیر بعد فرکتالی، به آسانی قابل سنجش نیستند. در این تحقیق روشی جدید برای سنجش این متغیرها برای رسوبات سد مخزنی سفید رود پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهند که بعد فرکتالی همواره متناظر با مقداری مشخص از ضریب تنش موثر می‌باشد و نباید این دو را به طور جداگانه برآورد نمود. بعد فرکتالی با حداکثر فراوانی را می‌توان به عنوان بعد فرکتالی برگزیده و مقدار ضریب تنش موثر نماینده را نیز می‌توان معادل مقدار متوسط آن از میان زوج‌هایی با مقدار بعد فرکتالی دانست. به طور کلی، تنش برشی بحرانی برای فرسایش دارای حساسیت زیادی نسبت به متغیر بعد فرکتالی می‌باشد و نشان داده شده که هر چه بعد فرکتالی کمتر باشد، تغییرات تنش برشی بحرانی برای فرسایش نسبت به تغییرات غلظت حجمی کمتر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: استوانه تحکیم، بستر چسبنده گلی، بعد فرکتالی، تنش برشی بحرانی، تنش موثر، مقاومت برشی واقعی بستر، مخزن سد سفید رود.

H_fouladfar@yahoo.com

M_shafai@yahoo.com

Fathi49@gmail.com

۱- نویسنده مسئول: دانشجوی دکتری سازه های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

مقدمه

دارد: (۱) تنش که توسط آن حرکت ذرات اتفاق می‌افتد. (۲) تنش که توسط آن فرسایش عمده‌ای اتفاق می‌افتد و (۳) نتیجه درونیابی رابطه بین نرخ فرسایش در مقابل تنش برشی برای فرسایش معادل صفر.

دو (۱۹۹۹) نیز سه تعریف دیگر برای آستانه حرکت رسوبات چسبنده ارائه نموده است. این تعاریف مختلف از تنش برشی بحرانی و آستانه حرکت تغییرات قابل ملاحظه‌ای را در نتایج حتی در شرایط آزمایشی مشابه ایجاد می‌نماید. با مقایسه برآوردهای تنش برشی بحرانی کلارک و وین (۲۰۰۷) در اندازه‌گیری‌های میدانی و با استفاده از روابط تجربی اسمردون و بیزلی (۱۹۶۱) و جولین و تورس (۲۰۰۶) دریافتند که تنش برشی بحرانی اندازه‌گیری شده خیلی بیشتر و یا خیلی کمتر از مقادیر پیش‌بینی شده بوده است.

به منظور خارج شدن از این ابهامات و در یک سیر منطقی، در این تحقیق مدلی برای تعیین تنش برشی بحرانی از طریق ارتباط آن با متغیرهای مکانی و زمانی ژئوتکنیکی بستر پیشنهاد شده است. در این مقاله در ابتدا، اقدام به ارائه مدل پیشنهادی تنش برشی بحرانی شده و در ادامه آن دو متغیر اساسی مدل یعنی ضریب تنش موثر و متغیر بعد فرکتالی که در واقع متغیرهای عمده مربوط به فرآیند نهشته شدن و تحکیم رسوبات بستر نیز می‌باشند، با کمک روابط حاکم بر تحکیم ناشی از وزن^۱ و آزمایش روی استوانه تحکیم تعیین گردیده است. لازم به ذکر است که تعیین این دو متغیر در کنار متغیر ضریب نفوذپذیری، غلظت حجمی و تنش موثر، برای مدل سازی فرآیند نهشته شدن و تحکیم رسوبات چسبنده نیز ضرورت دارد [۱]. رسوبات مورد آزمایش این تحقیق از مخزن سد سفید رود و در پائین دست محل الحاق رودخانه قزل‌اوزن برداشت شده‌اند.

به طور کلی فرسایش رسوبات چسبنده بستر زمانی اتفاق می‌افتد که سرعت جریان یا تنش برشی ناشی از جریان از یک مقدار بحرانی بیشتر شود. تلاش‌های گسترده‌ای برای ایجاد ارتباط بین تنش برشی بحرانی و متغیرهای رسوبات چسبنده صورت گرفته که در جدول (۱) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که غالب فرمول‌های خلاصه شده در جدول (۱) فاقد همگنی ابعادی می‌باشند. [۲]

به طور کلی، افزایش غلظت حجمی، و یا به عبارتی دیگر چگالی خشک، رسوبات بستر منجر به متراکم‌تر شدن ذرات و لخته‌های رسوبی و لذا باعث افزایش مقاومت رسوبات بستر می‌شود. بر طبق نظر بسیاری از محققین، نظیر مهتا (۱۹۷۵)، میچنر و ترفس (۱۹۹۶)، وانگ و ژانگ (۱۹۸۹)، ترن و پارسونس (۱۹۸۰) و کاو و دو (۱۹۸۶)، تنش برشی بحرانی ارتباط نزدیکی با غلظت حجمی رسوبات بستر دارد. [۲]

پارامترهای دیگری که غالباً در فرمول‌های تنش برشی بحرانی ظاهر شده‌اند، عبارت از مقاومت برشی، نسبت آب، شاخص خمیری رسوبات چسبنده و غیره می‌باشد. به طور کلی، روابط مندرج در جدول (۱) و سایر روابط موجود، چه در شکل ساده و چه در شکل پیچیده، نتایج متفاوتی را ارائه می‌دهند و همه آن‌ها تجربی بوده و قابل شمول برای کلیه شرایط نمی‌باشند. بسیاری از روابط موجود فقط برای داده‌های آزمایشگاهی محدود انجام شده توسط خود محققین مورد آزمون قرار گرفته‌اند و بعضی از فرمول‌ها حتی بدون هیچ‌گونه آزمایشی پیشنهاد شده‌اند. بعضی از محققین در آزمایش‌ها از نمونه‌های دست نخورده و بیشتر محققین از نمونه‌های بازسازی شده استفاده نموده‌اند. لذا تنوع در انواع نمونه‌های رسوبی امکان مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی را ضعیف کرده است. کمپس و هال (۱۹۸۳) دریافته‌اند که در چهار تحقیق روی یک رسوب تقریباً مشابه، ضریب تغییر در مقدار تنش برشی بحرانی تعیین شده در حدود ۲۰۰ بوده است. این میزان تغییر می‌تواند نتیجه خطای آزمایشگاهی، تغییر در روش‌های آزمایشگاهی، بیان ساده خصوصیات رسوبات بستر و اختلاف معیارها در تعریف آستانه فرسایش توسط محققین مختلف بوده است. سان فورد و ما (۲۰۰۱) نشان داده‌اند که حداقل سه تعریف مختلف از تنش برشی بحرانی وجود

جدول (۱): خلاصه روابط تنش برشی بحرانی برای فرسایش رسوبات چسبنده [2]

داده های آزمایشی	نمادها	رابطه	منابع
-	مقاومت برشی τ_c ؛ شاخص خمیری	$\tau_c = 0.01(\tau_c + 1800)\tan(30 + 1.73P)$	دان (Dunn 1959)
آزمایی با کمک قیوهر آزمایشگاهی، نمونه های رسوبات چسبنده میسوری	τ_c ، درصد وزنی رس (درصد)	$\tau_c = 0.163P^{0.84}$ ، $\tau_{c,0} = 0.493 \times 10^{0.183} C^{0.84}$	اسمدون و بیسلی (Smadon & Beasley, 1961)
داده های آزمایشگاهی چند مونت شامل مونت اصلی	τ_c ، وزن مخصوص رسوبات γ ؛ وزن مخصوص آب $C = 2.9 \times 10^{-1} \text{ gr/cm}$	$\tau_c = \frac{1}{775} [32(\gamma - \gamma_w) + \left(\frac{C}{\rho_w}\right) \frac{C}{d}]^{0.744}$	تانگ (Tang, 1963)
نمونه های بازسازی شده از رسوبات	چگلی رسوبات	$\tau_c = 6.85 \times 10^{-4} (\rho_w)^{2.44}$	اوی (Owen, 1975)
نمونه های بازسازی شده از رسوبات	-	$\tau_c = 5.42 \times 10^{-4} (\rho_w)^{2.28}$	ثورن و پارسون (Thorn and Parsons, 1980)
داده های قیوهر، نمونه های بازسازی شده از روخله زرد با اندازه ۰.۰۴۹-۰ میلیتر	-	$\tau_c = 0.7 \gamma_w^{0.9}$	کائو و دو (Cao and Du, 1986)
نمونه های رسوبی از دریاچه ها و مهنیا، اندازه متوسط ۰.۰۴۱-۰.۰۵۴ میلیتر	تنش برشی بحرانی فرسایش سطحی و توده ای	$\tau_{c,1} = 0.27k^{0.56}$ ، $\tau_{c,2} = 0.79k^{0.44}$	اوسوبو و موراوکو (Osubo and Muraoko, 1988)
مخلوط ذرات PVC و رسوبات روخله زرد	مقاومت پیچیده τ_c	$\tau_c = 0.58k$	هوا و وان (Hua and Wan, 1992)
داده های قیوهر، رسوبات دست نخورده، اندازه متوسط ۰.۰۴۱-۰.۰۵۴ میلیتر	چگلی رسوبات در حالت پایدار	$\tau_c = \frac{1}{10} \left[\frac{1}{\rho_w} (\gamma - \gamma_w) + \left(\frac{\rho_w}{\rho} \right)^{0.17} \right]$	لی و همکاران (Li et al, 1995)
داده های آزمایشگاهی از چندین مونت	نسبت θ ، کثافت رسوبات	$\tau_c = \theta (\rho - \rho_w)gd + \frac{9 \times 10^{-4}}{d} \left(\frac{s}{\rho_w} \right)^{0.15}$	یانگ (Yang, 1996)
مخلوط گل و ماسه	چگلی رسوبات	$\tau_c = 0.015(\rho_w - 1000)^{0.73}$	میچنر و تورف (Mitchener and Torff, 1996)
-	نسبت A ، قیوهر γ_w ؛ وزن مخصوص موزر رسوب k ؛ طول متحرک	$\tau_c = A\tau_c - \gamma_w \theta l$	هوانگ و همکاران (Huang et al, 1997)
داده های آزمایشگاهی چند مونت شامل مونت اصلی	$k^2 = 0.0164$	$\tau_c = k^2 \left(\frac{d'}{d} \right)^{0.11} \left[\frac{36 \rho_w - \rho}{\rho} gd + \left(\frac{\gamma_w}{\rho_w} \right)^{0.7} \tau_c + \frac{gk^2 \sqrt{6} l \sqrt{d}}{d} \right]$	دور (dou, 1999)
اندازه گیری های میدانی در روخله ساق	نسبت θ ؛ درصد سبک-رس (درصد)	$\tau_c = 0.1 + 0.01779k^2 + 0.0028(\rho_w)^2 - 2.34 \times 10^{-4} (\rho_w)^3$	جولیان و تورس (Julian and Torres, 2006)
نمونه های دست نخورده از سه روخانه و کانال	نسبت w ؛ نسبت f ؛ تغییر می نماید	$\tau_c = f(\tau_c)$ ، $\tau_c = f(w)$	هوانگ و همکاران (Hong et al, 2006)

در این رابطه ضریب تنش موثر K_{σ} تابعی از انواع خصوصیات میکروسکوپی رسوب گل (مقاومت پیوندی و لزجت) می‌باشد. D متغیر بعد فرکتالی رسوب می‌باشد و مقدار آن بین دو تا سه می‌باشد. این متغیر از اهمیت بسیار زیادی در حوزه رسوبات چسبنده و تبیین و مدل‌سازی پدیده لختگی^۲ دارد. همچنین از آن جهت تعیین غلظت ژله‌ای رسوبات چسبنده با کمک پارامتر برشی برای برآورد نرخ اختلاط می‌توان استفاده نمود. متغیر $K_{\sigma,0}$ نیز مربوط به پدیده خزش می‌باشد. این متغیر فرآیندی را توجیه می‌نماید که در آن با کاهش تنش موثر غلظت حجمی کاهش پیدا نمی‌کند و یا با افزایش غلظت حجمی تنش موثر زیاد نمی‌شود. البته $K_{\sigma,0}$ غالباً برای تشریح فرآیندهای پیش‌تحکیمی در مواد کاملاً پلاستیک بکار می‌رود.

در سطح مشترک آب و بستر، تنش‌های موثر تقریباً صفر می‌باشد (فقط وزن یک لخته)، بنابراین این ترم تنش موثر را می‌توان حذف کرد [۷]:

(۳)

$$\sigma'_v = K_{\sigma} \phi^{\frac{2}{3-D}} - K_{\sigma,0} \approx 0 \Rightarrow K_{\sigma,0} = K_{\sigma} \phi^{\frac{2}{3-D}}$$

با جایگزینی در رابطه مرکلباخ، معادله (۱) به صورت زیر می‌شود:

(۴)

$$\tau_{cr} = \tau_y = c'_a \phi + \frac{1}{3} \tan \phi' (1 + 2K_0) K_{\sigma} \phi^{\frac{2}{3-D}}$$

در این رابطه، چسبندگی بستر، c'_a ، زاویه اصطکاک داخلی، ϕ' ، و متغیر تنش جانبی، K_0 ، متغیرهای ژئوتکنیکی می‌باشند که به کمک روش‌ها و دستگاه‌های اندازه‌گیری آزمایشگاه مکانیک خاک قابل اندازه‌گیری می‌باشند ولیکن هنوز روشی برای تعیین ضریب تنش موثر K_{σ} و متغیر بعد فرکتالی D ابداع نشده است. در این مقاله روشی برای تعیین این دو متغیر مهم با کمک آزمایش استوانه تحکیم پیشنهاد شده است.

مدل پیشنهادی تنش برشی بحرانی

اگرچه مقاومت برشی واقعی در نزدیکی سطح تماس بستر و جریان، τ_y ، معمولاً بزرگ‌تر از تنش برشی بحرانی، τ_{cr} ، می‌باشد و تنش برشی بحرانی معمولاً معادل حداقل مقاومت برشی واقعی بستر می‌باشد ولیکن به دلیل قطعی بودن آن و اندک بودن تغییرات آن در مقایسه با تغییرات تنش برشی و همچنین به دلیل ارتباط تئوریک آن با متغیر مکانی و زمانی غلظت حجمی و یا چگالی خشک، به نظر متغیر جایگزین مناسبی رسیده است. از سوی دیگر، کلیه متغیرهای مربوط به مقاومت برشی را از طریق روش‌های آزمایشگاهی می‌توان مورد سنجش قرار داد و نیازی به اعمال متغیرهای تجربی و صحت سنجی نمی‌باشد. از سوی دیگر می‌توان با استفاده از روش‌های جایگزین برای سایر متغیرهای دخیل در نرخ فرسایش (نظیر جایگزینی ضریب نرخ فرسایش با نرخ فرسایش از روی گل روان^۱ در فرمول عمومی نرخ فرسایش بستر چسبنده) می‌توان نقیصه برآورد دست بالای تنش برشی بحرانی را جبران نمود.

مقاومت واقعی برشی بستر را می‌توان به صورت تابعی از چگالی، تنش موثر و چسبندگی محاسبه نمود. مرکلباخ (۱۹۹۶) رابطه‌ای بین غلظت حجمی رسوب ϕ و مقاومت برشی اصلی τ_y بر حسب خصوصیات میکروسکوپی استخراج نموده است.

(۱)

$$\tau_y = c'_a \phi + \frac{1}{3} \tan \phi' (1 + 2K_0) K_{\sigma,0} + \tan \phi' \sigma'_v$$

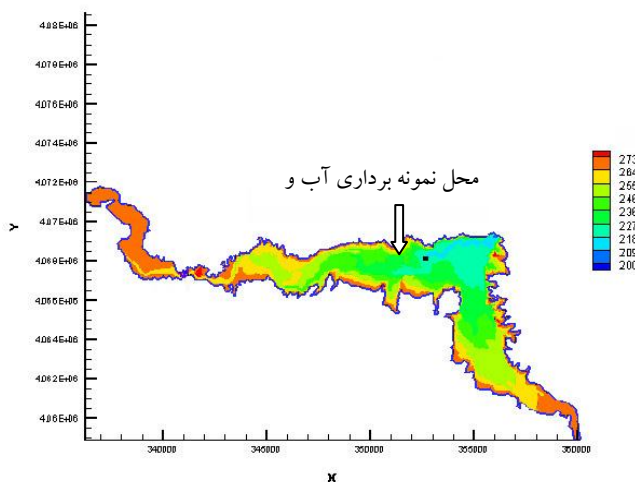
در این رابطه، c'_a چسبندگی واقعی، ϕ' زاویه اصطکاک داخلی، K_0 ضریب تنش جانبی، $K_{\sigma,0}$ متغیر تجربی پدیده خزش و σ'_v تنش موثر می‌باشد. از طرف دیگر مرکلباخ (۲۰۰۰) یک رابطه بنیانی برای بارگذاری یکنواخت به صورت زیر پیشنهاد نموده است:

$$\sigma'_v = K_{\sigma} \phi^{\frac{2}{3-D}} - K_{\sigma,0} \quad (۲)$$

نمونه‌گیری میدانی

نمونه رسوبی در خرداد ۱۳۹۰ از بستر مخزن سد سفیدرود جمع آوری شده است. سد سفیدرود در ۲۰۰ کیلومتری شمال غربی تهران و ۱۰۰ کیلومتری دریاچه خزر، کمی پائین‌تر از شهر منجیل و در محل تلاقی دور

رودخانه قزل‌اوزن و شاهرود واقع شده است. نمونه‌های آب و رسوب از محل الحاق رودخانه قزل‌اوزن و مخزن سد برداشت شده و مختصات جغرافیائی آن عبارتست از: $x=352820$ و $y=4068000$. موقعیت ایستگاه برداشت آب و نمونه‌های رسوبی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): محل نمونه‌برداری آب و رسوب بستر از مخزن سد سفیدرود

در ساعت ۱۰ صبح، نمونه‌گیری با اندازه‌گیری‌های پروفیل‌های قائم هدایت الکتریکی، غلظت، درجه حرارت، نسبت اکسیژن، پتانسیل اکسیداسیون و اسیدیته آب آغاز شد. نتیجه اندازه‌گیری‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است. از آنجائی که لایه‌بندی وجود نداشته است، مقادیر

متوسط در عمق ارائه شده اند. عمق آب محلی در طی اندازه‌گیری‌ها ده متر بوده و همه اندازه‌گیری‌ها در جدول (۲) با ادوات و ابزار آزمایشگاه کیفی منابع آب موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو انجام شده است.

جدول (۲): خصوصیات آب مخزن در موقعیت و در طی نمونه‌گیری

0.9	هدایت الکتریکی (میکروموس بر سانتیمتر)
0.16	غلظت مواد محلول (کیلوگرم بر متر مکعب)
22.5	درجه حرارت (درجه سلسیوس)
0.0072	نسبت اکسیژن (کیلوگرم بر متر مکعب)
79	نسبت اکسیژن (در صد وزنی)
	پتانسیل اکسیداسیون (mV)
	آب -
+130	
-290	رسوب -
7.8	PH (آب)

بیست کیلوگرم رسوب برداشت گردید. شکل‌های (۱) و (۲) نحوه نمونه‌گیری از رسوب را نشان می‌دهند. شش بشکه بیست لیتری آب نیز توسط عمل پمپاژ از وسط عمق جمع‌آوری گردید. در نیمه روز نمونه‌گیری‌ها به اتمام

رسوب بستر توسط یک گراپ باکت^۱ و از ده سانتیمتری فوقانی لایه رسوبی نمونه‌گیری انجام شد. از این طریق

شده نمونه‌های رسوبی را نشان می‌دهد. ترکیب کانی‌شناسی رسوب توسط روش تفرق اشعه ایکس تعیین شده است. این ترکیبات و بعضی خصوصیات کانی‌ها نظیر چگالی، ظرفیت تبادل یونی و سطح ویژه نمونه‌های رسوبی در جدول (۴) ارائه شده‌اند. دانه‌بندی ذرات نمونه رسوب در جدول (۵) و نمودار (۱) نشان داده شده است. نمونه رسوبی دارای حد خمیری ۲۸، حد روانی ۳۴ و اندکس خمیری ۶ می‌باشد.

شکل (۱) و (۲) نحوه نمونه‌گیری میدانی از رسوبات بستر مخزن سد سفید رود

رسید و نمونه‌های آب و رسوب با یک ماشین یخچال دار با دمای چهار درجه سلسیوس به آزمایشگاه منتقل شدند. رسوب در یخچال آزمایشگاه در دمایی بین چهار و هشت درجه سلسیوس و آب نیز در یک اتاق با هوای کنترل شده و با دمای ثابت بیست درجه سلسیوس نگهداری شده است. قبل از انجام آزمایش، رسوبات با الک یک میلیمتری غربال شدند. جدول (۳) خصوصیات فیزیکی شیمیائی اندازه‌گیری

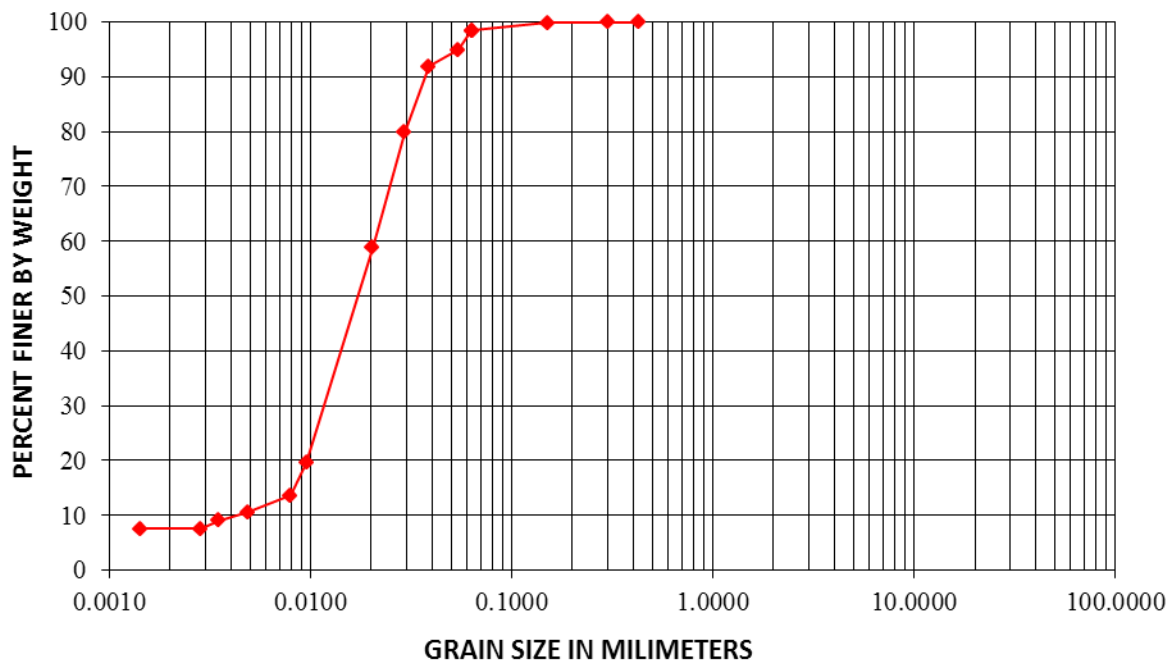


جدول (۳): خصوصیات فیزیکی شیمیائی نمونه رسوب

۰/۷۵	هدایت الکتریکی (میکروموس بر سانتیمتر)
۰	نسبت اکسیژن (کیلوگرم بر متر مکعب)
-۳۰۰	ظرفیت اکسیداسیون (mV)
۹/۵	نسبت مواد آلی (درصد وزنی)
۰/۲۲	سدیم (meq/100 gds)
۰/۵۳	پتاسیم (meq/100 gds)
۳۳	*منیزیم (meq/100 gds)
۲/۳۷	کلسیم (meq/100 gds)
۳۲	آهن (گرم بر کیلوگرم)
۲۲	ظرفیت تبادل یونی
۳۱	**نسبت خشک (درصد)
۱۱۸/۵	سطح ویژه (متر مربع بر گرم)

جدول (۴): ترکیب و خصوصیات کانی‌شناسی نمونه رسوب

نوع کانی	درصد وزنی (%)	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	ظرفیت تبادل یونی	سطح ویژه (متر مربع بر گرم)
کلریت Chlorite	۱۰	۲۶۰۰-۲۹۰۰		
ایلیت Illite	۲۰	۲۶۰۰-۲۸۶۰	۴۰	۸۰
کائولینیت Kaolinite	۵	۲۶۱۰-۲۶۴۰	۳-۸	۱۳-۲۶
کوارتز Quartz	۳۰	۲۶۵۰		
کلسیت Calcite	۷	۲۷۲۰		
دولومیت Dolomite	۳	۲۸۵۰		
مواد آلی Organic matter	کمتر از ۱			



نمودار (۱) : دانه‌بندی رسوبات بستر

سراسری عمقی از طریق لوله مغزه‌گیری از رسوب در وسط استوانه تحکیم بعد از هر دوره زمانی تحکیم انجام می‌شود. بعد از عمل مغزه‌گیری استوانه تخلیه می‌شود و مجدداً مخلوط آب و رسوب به درون استوانه ریخته می‌شوند و به آن اجازه رسوب‌گذاری و تحکیم تا دوره زمانی بعدی داده می‌شود و بعد از تمام شدن زمان تحکیم مورد نظر، مجدداً از وسط استوانه تحکیم مغزه‌گیری می‌شود. لوله نمونه‌گیری بعد از هر دوره مغزه‌گیری جهت اندازه‌گیری چگالی خشک در ترازهای مختلف بستر (هر پنج میلیمتر) به آزمایشگاه منتقل می‌شود.

بررسی آزمایشگاهی

بررسی آزمایشگاهی در استوانه‌ای با قطر و بلندای سی سانتیمتر (تا تراز سرریز) انجام شده است. شکل (۳) نمایی از این دستگاه را نشان می‌دهد.

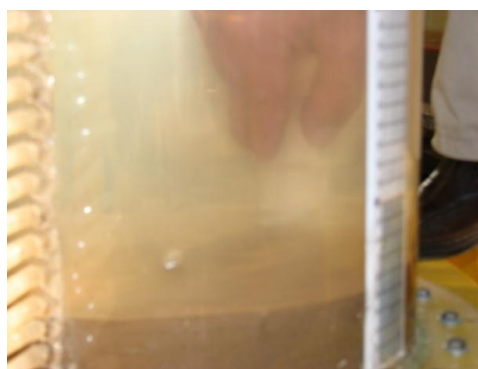
نمونه رسوبات برداشتی از مخزن سد سفید رود، بعد از اختلاط کامل، به استوانه تحکیم منتقل می‌شود. ارتفاع اولیه آب و رسوب در استوانه سی سانتیمتر و غلظت اولیه ۵۰۰ گرم در لیتر می‌باشد. به منظور اطمینان از زهکشی کامل و یکنواخت رسوبات در حال نشست، در کف استوانه یک شیر خروجی جهت تخلیه آب و رسوب تعبیه شده است. جهت اندازه‌گیری چگالی خشک، نمونه‌برداری



شکل (۳): نمائی از دستگاه استوانه تحکیم

تدریجی تحکیم را در طی ۱۶۸ ساعت و شکل‌های (۱۱) الی (۱۳) روش نمونه‌گیری از بستر را نشان داده‌اند.

این کار در شش مرحله مربوط به شش دوره زمانی ۶، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۱۴۴ و ۱۶۸ ساعت به نحوی مشابه آنچه که گفته شد، تکرار می‌شود. شکل‌های (۴) الی (۱۰) فرایند



شکل (۱۲): مغزه‌گیری از بستر



شکل (۱۱): سرنگ جهت مغزه‌گیری از بستر



شکل (۱۳): نمونه گرفته شده از بستر در یکی از دوره‌های تحکیم



شکل (۷): دوره تعکیم : ۳۸ ساعت،
غلظت اولیه : ۵۰۰ گرم در لیتر،
ارتفاع رسوبات پستری : ۵/۵ سانتیمتر



شکل (۶): دوره تعکیم : ۳۴ ساعت،
غلظت اولیه : ۵۰۰ گرم در لیتر،
ارتفاع رسوبات پستری : ۶ سانتیمتر



شکل (۵): دوره تعکیم : ۶ ساعت،
غلظت اولیه : ۵۰۰ گرم در لیتر،
ارتفاع رسوبات پستری : ۷ سانتیمتر



شکل (۳): آغاز رسوبگذاری،
غلظت اولیه : ۵۰۰ گرم در لیتر،
ارتفاع مخلوط آب و رسوب : ۳۰ سانتیمتر



شکل (۱۰): دوره تعکیم : ۱۰ ساعت،
غلظت اولیه : ۵۰۰ گرم در لیتر،
ارتفاع رسوبات پستری : ۵/۵ سانتیمتر

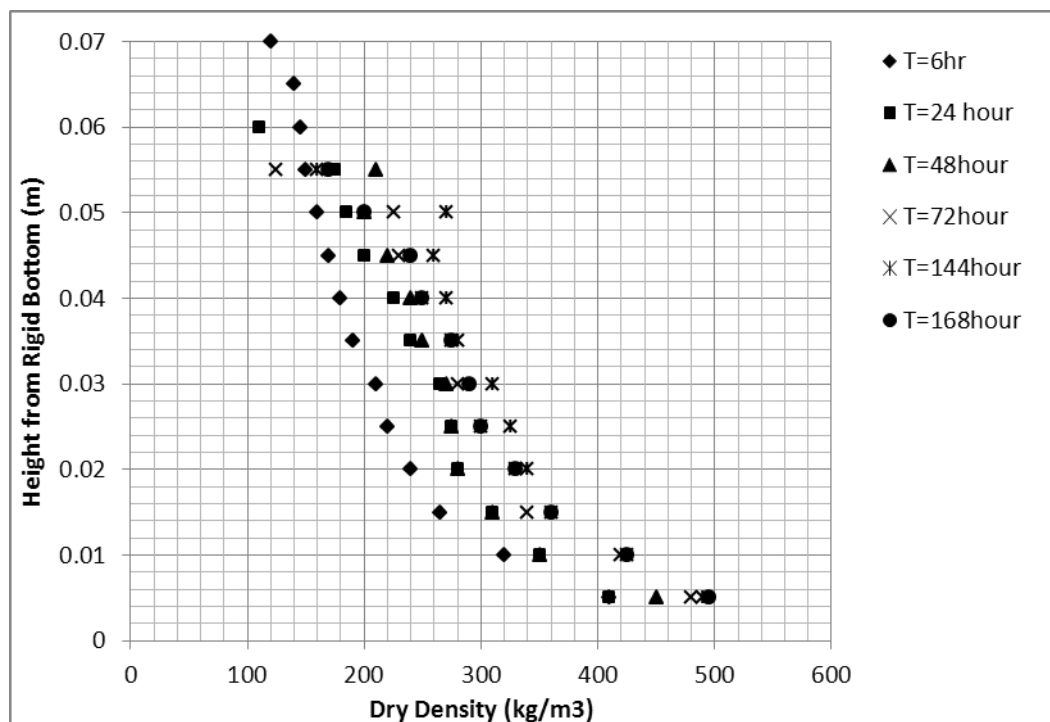


شکل (۳): دوره تعکیم : ۳۷ ساعت،
غلظت اولیه : ۵۰۰ گرم در لیتر،
ارتفاع رسوبات پستری : ۵/۵ سانتیمتر



شکل (۸): دوره تعکیم : ۸ ساعت،
غلظت اولیه : ۵۰۰ گرم در لیتر،
ارتفاع رسوبات پستری : ۵/۵ سانتیمتر

اندازه‌گیری‌ها در نمودار (۲) نشان داده شده است.



نمودار (۲): نتایج اندازه‌گیری چگالی خشک در استوانه تحکیم

صلب در $(z=0)$ و تخلخل نسبی e به صورت متغیری وابسته استخراج نمود. این معادله حاوی یک ترم جابجایی و یک ترم پخشیدگی می‌باشد.

تعیین ضریب تنش موثر و متغیر بعد فرکتالی

روش پیشنهادی تعیین متغیرها

گیسون (۱۹۸۱) یک معادله تحکیم یک بعدی در جهت قائم در مختصات زمان t و ارتفاع بستر z (با کفی

$$\frac{\partial e}{\partial t} + (1+e)^2 \Delta \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{(1+e)^2} \right) + \frac{(1+e)^2}{g\rho_w} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{1+e} \frac{\partial \sigma'_v}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

از معادله فوق می‌توان یک معادله تعادلی در حالت دائمی و ماندگار $\partial\phi/\partial t = 0$ و با کمک رابطه بنیانی مرکلباخ به صورت زیر استخراج نمود:

$$h - z = 2 \frac{K_\sigma}{(D-1)(\rho_s - \rho_w)g} \phi^{\frac{D-1}{3-D}} \quad (7)$$

$(h-z)$ فاصله زیر سطح مشترک آب و رسوب می‌باشد. با رسم مقدار $(h-z)$ در مقابل غلظت حجمی روی یک کاغذ تمام لگاریتمی، معادله تعادلی فوق تبدیل به معادله یک خط مستقیم می‌شود:

در این معادله دیفرانسیلی، k متغیر معرف نفوذپذیری، σ'_v تنش موثر عمودی (تنش کل منهای فشار آب منفذی)، Δ چگالی نسبی مواد رسوبی و ρ_w چگالی آب می‌باشد. با استفاده از رابطه غلظت حجمی و تخلخل به صورت $\phi = \frac{1}{1+e}$ معادله فوق را می‌توان به صورت معادله دیفرانسیلی ساده‌تری بر حسب غلظت حجمی استخراج نمود.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} - \Delta \phi^2 \frac{\partial}{\partial z} [k\phi] - \frac{\phi^2}{\rho_w g} \frac{\partial}{\partial z} \left[k\phi \frac{\partial \sigma'_v}{\partial z} \right] = 0 \quad (6)$$

(۸)

$$\log(h-z) = \log\left[\frac{2K_{\sigma}}{(D-1)(\rho_s - \rho_w)g}\right] + \frac{D-1}{3-D} \log \phi$$

وقتی که $(h-z)$ در مقابل ϕ روی کاغذ تمام لگاریتمی ترسیم می‌شود، شیب خط مستقیم گذرنده از داده‌ها، R ، معادل $(D-1)/(3-D)$ می‌باشد.

K_{σ} را می‌توان با جای گذاری در یک جفت $(h-z, \phi)$ تعیین نمود.

برآورد اولیه متغیرها

در زمان استفاده از روش پیشنهادی، سه معضل پیش می‌آید. معضل اول این‌که، اندازه‌گیری‌های ۲۴ ساعت و بعد از آن را نمی‌توان در نمودار (۲) به وضوح از یکدیگر متمایز نمود. توضیحی که می‌توان در این ارتباط داد این است که همه پروفیل‌های ۲۴ ساعته و بعد از آن در موقعیت تعادلی می‌باشند و این که اختلافها فقط ناشی از خطاهای اندازه‌گیری می‌باشد. توضیح دیگر آن‌که، بعضی از پروفیل‌ها هنوز در حالت تعادل نمی‌باشند و این که قسمتی از اختلافها ناشی از اضافه فشارهای آب منفذی می‌باشد. چگالی خشک پروفیل‌های ۴ و ۲۴ ساعت پائین‌تر از غلظت حجمی‌های سایر پروفیل‌ها می‌باشد، لذا آن‌ها هنوز اضافه فشارهای آب منفذی نسبت به بقیه دارند. بنابر این، پروفیل بعد از ۴۸ ساعت را می‌توان در مرحله نهائی تحکیم ارزیابی نمود و همه نقاط داده‌ای به جز نقاط داده‌ای ۴ و ۲۴ ساعت را می‌توان برای تعیین تنش ضریب موثر و بعد فرکتالی تعیین نمود. دومین معضل این است که پروفیل تعادلی تشریح شده معادله (۷) نشان دهنده یک افزایش خطی تنش موثر نسبت به عمق و یک پروفیل غلظت حجمی با انحنای نرم و بدون نقطه عطف می‌باشد. علاوه بر آن، طبق این معادله، گرادیان غلظت حجمی در نزدیکی بستر صلب تقریباً صفر می‌باشد. در صورتی که پروفیل‌های اندازه‌گیری شده نشان دهنده یک پروفیل غلظت حجمی با یک دنباله با یک غلظت حجمی خیلی زیاد در نزدیکی بستر صلب می‌باشد (وجود نقطه عطف). چنین رفتاری را می‌توان ناشی

از حضور ماسه در نمونه رسوب دانست. در واقع، ترکیب رسوبات به کار رفته نشان دهنده ۳۰٪ درصد کوارتز می‌باشد. معلوم شده که ماسه دارای سرعت نشست خیلی بیشتری نسبت به رسوب گلی می‌باشد. در طی تحکیم، ماسه از رسوب گلی جدا شده و تشکیل یک لایه ماسه‌ای در نزدیکی بستر صلب می‌دهد (اگرچه جدا شدگی وابسته به شرایط اولیه می‌باشد). در بالای این لایه ماسه‌ای پروفیل تحکیم رسوب گلی شکل می‌گیرد. بنابراین، در زمان تعیین متغیرهای تنش موثر، از قسمت‌های تحتانی پروفیل‌های غلظت حجمی باید صرف نظر گردد. هر چند که تمام ماسه تشکیل لایه ماسه زیر لایه رسی نمی‌نماید. بعضی ذرات ماسه ریز هستند و قسمتی از بستر تحکیم یافته رسوبات گلی را تشکیل می‌دهند. بنابراین، ارتفاع لایه ماسه‌ای خیلی مشخص نیست و خیلی روشن نیست که آیا نیازی به حذف نقطه می‌باشد و یا خیر. لازم به ذکر است که غالب رسوبات طبیعی محتوی مقداری ماسه می‌باشند و این مسئله در اغلب حالات مهندسی رخ می‌دهد.

سومین معضل این که پروفیل تعادلی تشریح شده توسط معادله گیبسون و روابط مبنائی مرکلباخ معادله (۷) نشان دهنده یک گرادیان تیز در پروفیل غلظت حجمی در نزدیکی سطح مشترک می‌باشد. تراز سطح مشترک در این آزمایش‌ها خیلی روشن نیست. به دلیل گرادیان زیاد غلظت حجمی در نزدیکی سطح مشترک، یک تغییر کوچک در تراز اندازه‌گیری همیشه همراه با تغییر زیاد در غلظت حجمی می‌باشد. به علاوه، اندازه‌گیری‌های نزدیکی سطح مشترک زیاد قابل اعتماد نمی‌باشند. در واقع، در نزدیکی سطح مشترک خطاهای زیاد در داده‌ها مورد انتظار است. ارتفاع سطح مشترک در مرحله نهائی تحکیم ۶/۳ سانتیمتر می‌باشد، در صورتی که بالاترین اندازه‌گیری در ۵/۵ سانتیمتری انجام شده است. به علاوه، اندازه‌گیری غلظت حجمی پروفیل تعادلی در دامنه بالای ۱۲۰ تا ۲۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد (جدول ۶). به طور کلی، اندازه‌گیری چگالی خشک خیلی کوچک در نزدیکی سطح مشترک مشکل است. این مسئله در غالب حالات وجود دارد.

جدول (۶): چگالی خشک بستر در سطح مشترک برای زمان های مختلف تحکیم

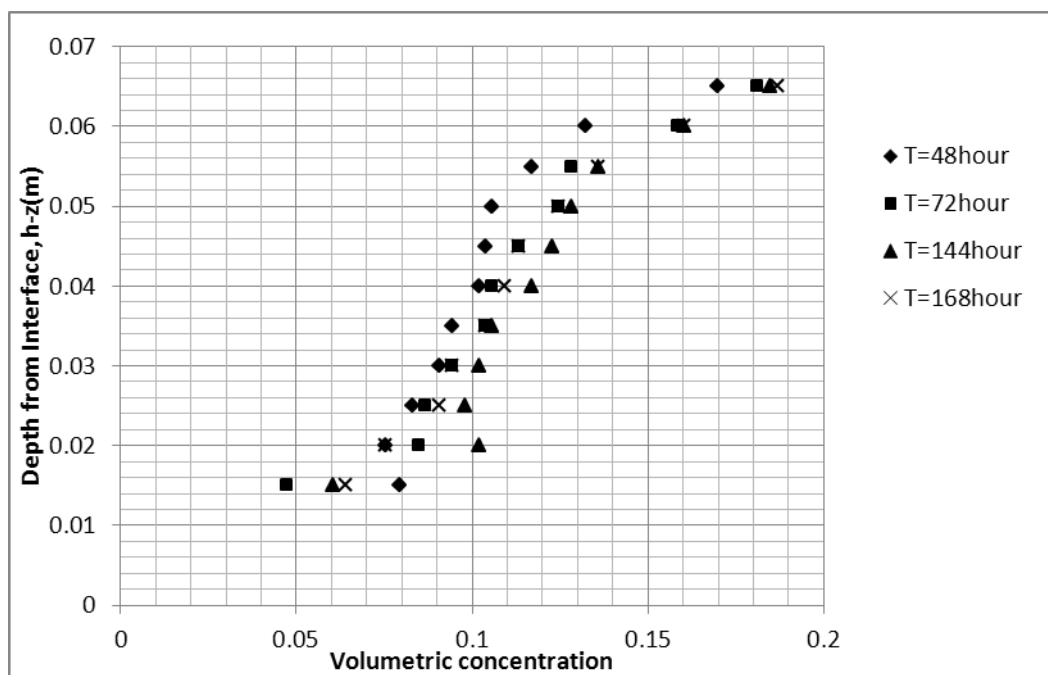
۱۶۸	۱۴۴	۷۲	۴۸	زمان تحکیم (ساعت)
۱۶۵	۱۵۵	۱۲۰	۲۱۰	چگالی خشک در نزدیکی سطح مشترک آب و بستر (کیلوگرم بر متر مکعب)

شده‌اند. در این برازش، از تعدادی نقاط در نزدیکی سطح مشترک و تعدادی نقاط در نزدیکی بستر صلب صرف نظر شده است. متغیرهای به دست آمده از این طریق عبارتند از:

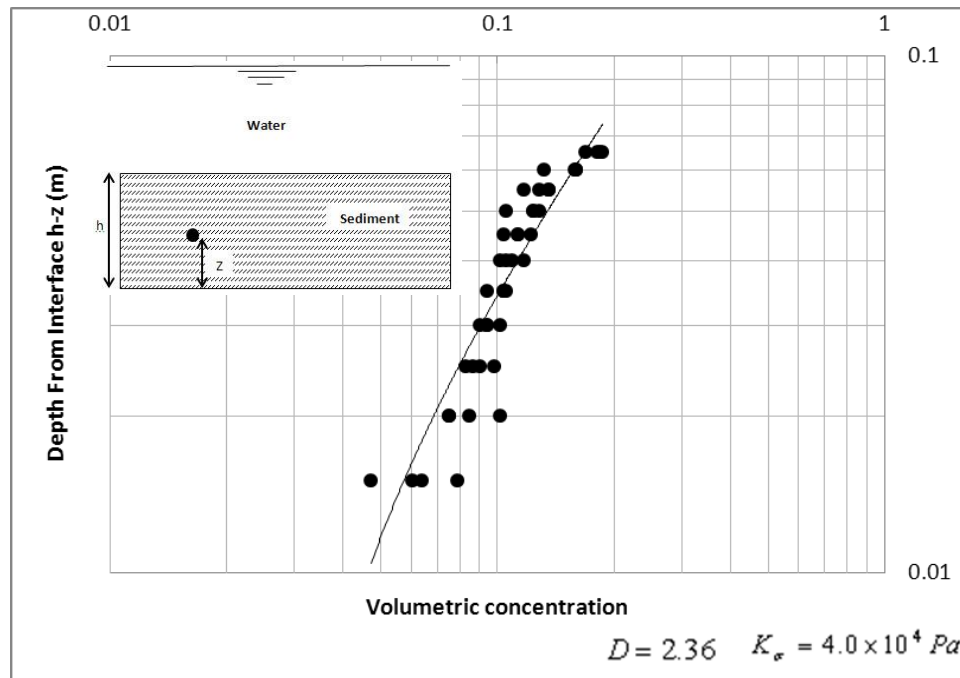
$$D = 2.36 \text{ و } K_{\sigma} = 4.0 \times 10^4 \text{ Pa}$$

در این نمودار پوشش قسمت میانی داده‌ها، مناسب‌ترین محدوده نماینده قسمت ترسیم شده است.

با استفاده از تغییرات اندازه‌گیری شده چگالی خشک در مقابل ارتفاع از بستر صلب می‌توان نمودار دیگری از تغییرات غلظت حجمی در مقابل عمق از سطح تماس آب و رسوب ساخت. (شکل ۳). شکل (۴) نشان دهنده یک برازش نماینده برای کل داده‌های غلظت حجمی در مقابل فاصله از سطح بستر می‌باشد. قابل ذکر این در نمودار، h عمق رسوبات بستر و Z فاصله از کف بستر می‌باشد. نمودار در مقیاس تمام لگاریتمی ترسیم شده است. این ارتفاع سطح مشترک از اندازه‌گیری‌های نشست سطح مشترک بازیافت



نمودار (۳): تغییرات غلظت حجمی در مقابل عمق از سطح تماس آب و رسوب

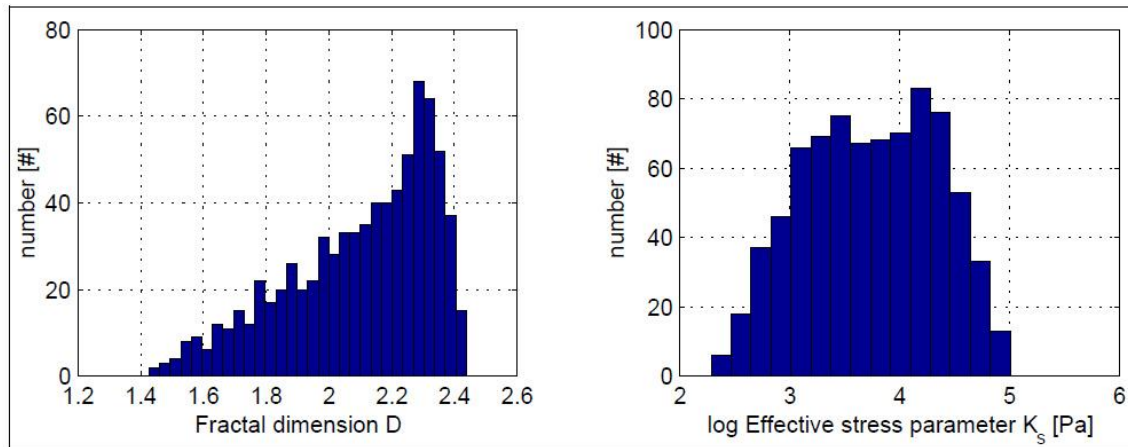


نمودار (۴): متوسط برازش حداقل مربعات غلظت حجمی در مقابل عمق بستر برای تعیین K_{σ} و D

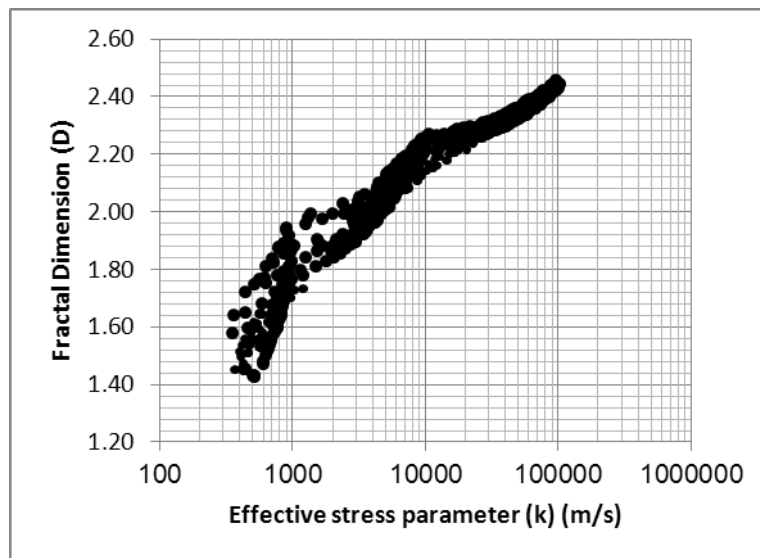
ترکیبی خاص نقاط داده‌ای به دست می‌آید. انتخاب حجم نقاط حذفی در دو سمت بدین‌گونه صورت گرفته که حداقل شش نقطه داده‌ای در آنالیز سهمیم باشند. این کار باعث ایجاد جمعا ۷۰۸ جفت (K_{σ}, D) می‌شود. نتایج همه برازش‌ها در نمودارهای (۵) و (۶) نشان داده شده است. نمودارهای منطبق با همه برازش‌های حداقل مربعات به طور مستقل بررسی شده‌اند. مقادیر خیلی پائین ضریب تنش موثر K_{σ} (مرتباً ۱۰۰ پاسکال) منطبق با حالتی می‌باشد که فقط نقاط نزدیک بستر صلب برازش داده شده‌اند. این برازش‌ها کم‌ترین نمایندگی را دارند. آن‌ها فقط داده‌های محتوی ماسه را برازش می‌دهند. این خطوط مقادیر پائینی را برای ضریب تنش موثر و بعد فرکتالی ارائه می‌دهند.

دامنه تغییرات متغیرها با کمک برازش‌های چندگانه حداقل مربعات

اکنون می‌دانیم که داده‌های اندازه‌گیری شده در یک سمت به دلیل حضور ماسه و در سمت دیگر به دلیل عدم قطعیت‌های بزرگ در اندازه‌گیری‌های نزدیک سطح مشترک باید حذف گردند. اگرچه روشن نیست که کدام داده‌ها نباید در آنالیزها سهمیم باشند. بنابراین خط مستقیمی که برای برازش نقاط داده‌ای در کاغذ تمام لگاریتمی مورد استفاده قرار می‌گیرد، باید بر مبنای بعضی از داده‌های میانی باشد. اما حجم نقاط داده‌ای حذفی در هر دو سمت، روی شیب و جابجائی خط تاثیر می‌گذارد. بنابراین خطوط مختلفی می‌توان رسم نمود و برازش‌های بسیار زیادی از طریق حذف نقاط داده‌ای از دو طرف مجموعه داده‌ها، می‌توان تولید نمود. برای هر برازش،



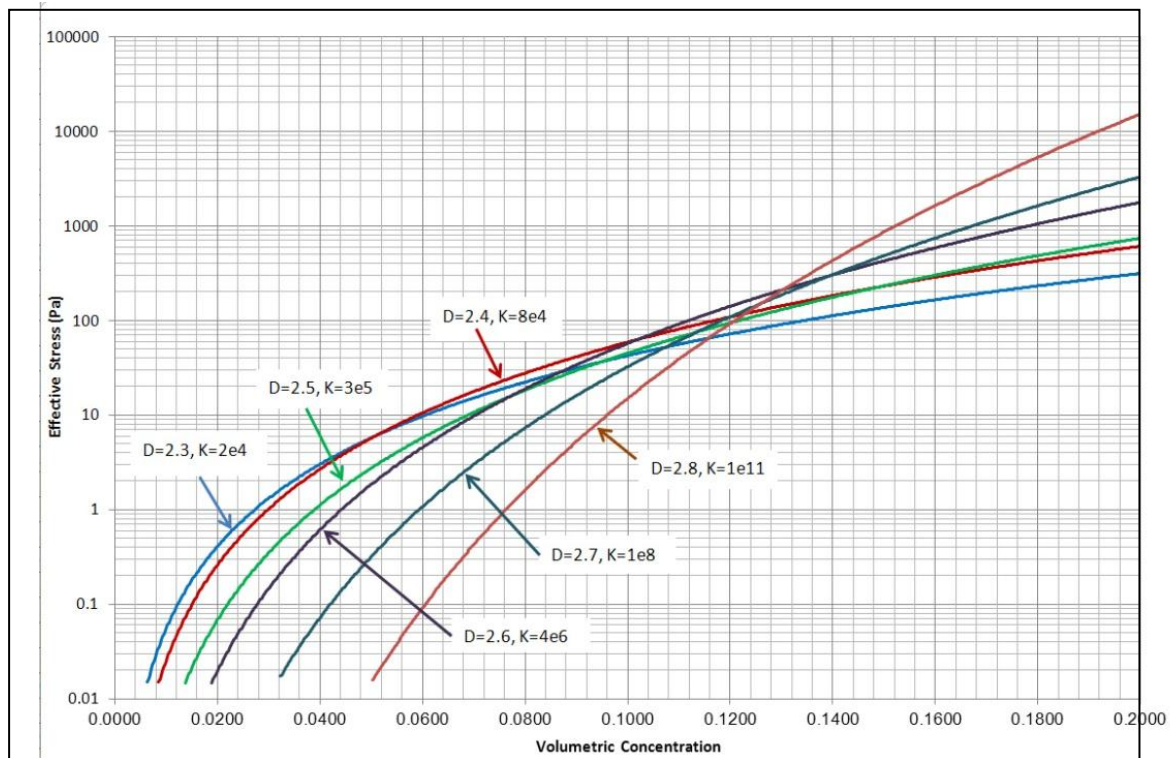
نمودار (۵): هیستوگرام نتایج همه برازش‌های حداقل مربعات غلظت حجمی در مقابل عمق بستر برای تعیین D و K_σ



نمودار (۶): رابطه بین D و K_σ برای برازش‌های مختلف

می‌دهد که هر چه بعد فرکتالی کمتر باشد، افزایش تنش موثر، (یا به عبارتی دیگر افزایش تنش برشی بحرانی برای فرسایش بستر) نسبت به غلظت حجمی تدریجی‌تر خواهد بود.

رابطه بین تنش موثر σ'_v (که ارتباط مستقیم با مقاومت برشی τ_v یا تنش برشی بحرانی برای فرسایش بستر دارد) و غلظت حجمی ϕ در نمودار (۷) برای ترکیب‌های مختلف D و K_σ از نمودار (۵) ترسیم شده است. نمودار نشان



نمودار (۷): رابطه بین تنش موثر σ'_v و غلظت حجمی ϕ برای مجموعه های D و K

نتیجه گیری

برای تنش برشی بحرانی فرسایش بستر چسبنده هنوز تعریف روشن و مشخصی صورت نگرفته و مدلی ثابت و قابل قبول برای برآورد آن ارائه نشده است. چنانچه فرض شود تنش برشی بحرانی برای فرسایش معادل مقاومت برشی واقعی بستر باشد، آنگاه می توان با استفاده از روابط و روش های آزمایشگاهی کلیه متغیرهای موثر بر آن را به سهولت مورد سنجش قرار داد و نیازی به اعمال متغیرهای تجربی و فاقد مفاهیم فیزیکی نمی باشد. علاوه بر آن، فرض مذکور تنش برشی بحرانی را به صورت تابعی از زمان و عمق بستر برآورد می نماید که به ماهیت واقعی تنش برشی بحرانی نزدیک می باشد. تنها معضلی که در این ارتباط بوجود می آید این است که معمولاً تنش برشی بحرانی کوچک تر از مقاومت برشی بستر می باشد و استفاده از این مدل در روابط فرسایش، نرخ فرسایش را تا حد زیادی کاهش خواهد داد ولیکن نظر به اینکه جهت برآورد نرخ فرسایش، متغیر تنش برشی بحرانی در اندرکنش با متغیرهای دیگری مانند ضریب نرخ فرسایش و تنش برشی جریان می باشد، می توان این نقیصه را از طریق تعاریفی

جدید برای متغیرهای دخیل و ایجاد توازن در معادله جبران نمود.

در این مقاله روشی برای به دست آوردن متغیرهای مهم مدل مذکور که مرتبط با نهشته شدن و تحکیم رسوبات می باشد، شامل ضریب تنش موثر و بعد فرکتالی، ارائه شده است. با ساده سازی معادله گیبسون و استخراج معادله حالت دائمی و ماندگار تغییرات عمقی غلظت حجمی که در مقیاس لگاریتمی رابطه ای خطی بین تراز نقطه مورد نظر در بستر از کف صلب و غلظت حجمی را نشان می دهد، خطوطی قابل ترسیم است که شیب آن ها معادل مقدار بعد فرکتالی خواهد بود و ضریب تنش موثر را نیز با استفاده از روابط خطی مذکور می توان تعیین نمود. برای تعیین این خطوط از آزمایش نهشته شدن و تحکیم در یک استوانه تحکیم و استفاده از تکنیک برازش استفاده شده است.

روش برازش را نمی توان روی همه نقاط داده ای اندازه گیری شده اجرا نمود. محدودیت های فیزیکی که در چهارچوب آن ها روش برازش قابل استفاده است، قید و بندی را در تعداد نقاط داده ای که باید برای یک برازش مورد استفاده قرار گیرد، ایجاد خواهد نمود. به علاوه، مجموعه نقاط داده ای که باید مورد استفاده قرار گیرد، از

مستقل منجر به یک طیف از مقادیر بعد فرکتالی می‌شود. مقدار مود (نما) بعد فرکتالی خطی را با بالاترین احتمال برازش داده شده ارائه می‌دهد. توصیه این است که مقدار مود بعد فرکتالی به عنوان مقدار نماینده بعد فرکتالی و مقدار ضریب تنش موثر نیز معادل مقدار متوسط ضریب تنش موثر از میان زوج‌هایی با مقدار مود بعد فرکتالی در نظر گرفته شود. نتایج نشان داده‌اند که تنش برشی بحرانی برای فرسایش دارای حساسیت زیادی نسبت به متغیر بسیار مهم بعد فرکتالی می‌باشد و نشان داده شده که هر چه بعد فرکتالی کمتر باشد، تغییرات تنش برشی بحرانی برای فرسایش نسبت به تغییرات غلظت حجمی کمتر خواهد بود.

قبل دقیقاً معلوم نیستند. این بدین معناست که تعداد زیادی برازش چندگانه ممکن خواهد بود و هر برازشی منجر به مجموعه متفاوتی از متغیرها خواهد بود. در نتیجه، اگر افراد مختلف برازش را انجام دهند به نتایج مختلفی برای متغیرها خواهند رسید. روشی مورد نیاز است که نتیجه معقولی را نتیجه بدهد. این روش منطقی می‌تواند پیاده سازی همه برازش‌های ممکن و منطقی روی کاغذ تمام لگاریتمی و بحث و بررسی آماری آن‌ها باشد. تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی نشان داده‌اند که مقدار بعد فرکتالی همیشه همراه با مقداری مشخص از ضریب تنش موثر می‌باشد و نمی‌توان در بررسی‌های آماری این دو را به طور جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. مقادیر بعد فرکتالی توسط روش‌های برازش چندگانه

منابع

- ۱- صمدی بروجنی، ح.، م. شفاعی بجستان و م. فتاحی مقدم. ۱۳۸۶. بررسی فرآیند ته نشینی و تحکیم رسوبات چسبنده مخزن سد دز. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، شماره چهارم (الف).
- 2- ZHU ongHui, Lu JinYou, LIAO HongZhi, Wang JiaSheng, FAN Beilin & YAO ShiMing. 2008. Research on cohesive sediment erosion by flow : An overview, Science in China Series E: Technological Sciences.
- 3-Kamphuis, J.W., K.R. Hall. 1983. Cohesive material erosion by unidirectional current. J Hydr Eng, ASCE, 109(1): 49—61.
- 4- Sandford, L.P. and J.P.Y. Maa. 2001. A unified erosion formulation for fine sediments. Mar Geol, 179: 9—23.
- 5- Merkelbach, L. 1996. Consolidation theory and rheology of mud. A literature survey. Techn. Report no. 9-96, Delft University of Technology.
- 6- Merkelbach, L. 2000. Consolidation and strength evolution of soft mud layers. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering report 00-2, Delft University of Technology.
- 7- Merkelbach, L. 2001. Note on parametrisation of Gibson's consolidation equation. Internal memo WL/Delft Hydraulics.
- 8- Gibson, R.E., R.L. Schiffman and K.W. Cargill. 1981. The theory of one- dimensional saturated clays. 11. Finite nonlinear consolidation of thick homogeneous layers. Can. Geotech. J., 18, 280-293.

Experimental study and modeling of critical shear stress for cohesive sediment erosion

H. Fooladfar¹, M. Shafai Bajestan², M. Fathi Moghaddam³

Abstract

Yet, the estimation of critical shear stress for cohesive sediment erosion as a function of degree of consolidation and elevation of exposed layer of the bed sediment is under consideration around the world. Sediment shear strength in the vicinity of the interface can be a good delegate of critical shear stress. Because one can relate this parameter to some parameters such as volumetric concentration and effective stress which are function of time and space and can be modeled analytically. Moreover one can measure the coefficients such as fractal Dimension, effective stress coefficient, Creep coefficient, lateral stress coefficient, internal friction angle and cohesion coefficient, using experimental techniques. Some of these coefficients are used to be measured by soil mechanical laboratorial experiment. However for measuring of fractal dimension and effective stress coefficient, there is not any documented method. In this paper, an experimental method has been developed using a settling cylinder for bed sediments of Sefidrud Dam reservoir. Experimental results have shown that every fractal dimension has always been jointed with specific effective stress coefficient. Moreover the best value for fractal dimension is the mode of its frequency distribution. Therefore the best value for effective stress coefficient is its average between the pairs with the same selected fractal Dimension. In General, critical shear stress is very sensitive to fractal dimension and it has been shown that the less fractal dimension, the less rate of critical shear stress with respect to volumetric concentration.

Keywords : cohesive sediment bed, surface erosion, critical shear stress, bed shear strength, effective stress, fractal dimension, settling cylinder, sefidrud dam reservoir.

¹- PhD student of faculty of Water Science Engineering of Ahvaz Chamran University

²- Professor of faculty of Water Science Engineering of Ahvaz Chamran University

³- Professor of faculty of Water Science Engineering of Ahvaz Chamran University