

فرمولی فیزیک مبنا برای شار فرسایش بستر چسبنده

حسام فولادفر^{۱*}، محمود شفاعی بختستان^۲ و منوچهر فتحی مقدم^۳

۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکترای سازه های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز h_fouladfar@yahoo.com

۲- استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استاد دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۲/۶/۲۰ تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۱۴

چکیده

فرمولهای مورد استفاده برای محاسبه نرخ فرسایش بستر چسبنده فاقد مبانی فیزیکی بوده و قادر به تشریح فرسایش بستر در حال تحکیم و در معرض سیلاب ها و طوفان ها نمی باشند، لذا نیاز به رویکرد و فرمول و الگوریتم مدل سازی جدیدی می باشد که دارای سرعت و دقت کافی و لازم جهت استفاده در مدل سازی کیفیت آب باشد. فرمول جدید پیشنهادی، تنش برشی بستر را به صورت یک متغیر احتمالاتی ساده تک متغیری در نظر می گیرد. این فرمول، نرخ فرسایش پتانسیل را معادل نرخ فرسایش از روی گل روان که به عنوان پدیده اختلاط کاملاً قابل تحلیل می باشد، در نظر می گیرد. در فرمول، تنش برشی بحرانی معادل مقاومت برشی بستر در حالت زهکشی شده و در نزدیکی سطح مشترک بستر و بدنه جریان در نظر گرفته شده است. مقاومت برشی واقعی بستر را می توان با کمک روابط موجود به چگالی خشک رسوبات بستر و چسبندگی ارتباط داد. فرمول پیشنهادی نیاز به هشت متغیر دارد. هفت متغیر آن را می توان با کمک آزمایش های مکانیک خاک و استوانه تحکیم و روابط موجود اندازه گیری کرده و به برآوردهای قابل قبولی از آنها دست پیدا کرد. تنها متغیری که قابل محاسبه نبوده و باید در مرحله واسنجی مورد ارزیابی قرار گیرد، ضریب مربوط به توزیع احتمال تنش برشی لحظه ای می باشد. برای ارزیابی فرمول، بعد از نمونه برداری از آب و رسوبات بستر مصب مخزن سد سفیدرود در ناحیه وروود رودخانه قزل اوزن، آزمایش های کوتاه مدت فرسایش در یک فلوم مستقیم با امکان گردش آب و رسوب و آزمایش های تحکیم در یک استوانه تحکیم انجام شد. در فلوم مستقیم برای هفت دوره تحکیم (بارگذاری ناشی از وزن)، چندین مجموعه آزمایش انجام شد. فرمول پیشنهادی نتایج آزمایشگاهی را با دقت مناسبی شبیه سازی نموده و به خوبی ظرفیت واسنجی دارد.

کلید واژه ها: فرسایش بستر چسبنده، تحکیم، تنش برشی، مقاومت برشی، ضریب نرخ فرسایش، اختلاط، چگالی خشک، واسنجی

Physically Based New Formula for Cohesive Bed Erosion Rate

H. Fouladfar¹, M. Shafaei Bajestan², M. Fathi-Moghadam³

1- PhD student, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

2- Professor, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

3- Professor, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

Received: 2 Feb. 2013 Accepted: 11 Sep. 2013

Abstract

The currently most widely used erosion models are poorly based on physical principles and lack the ability to describe erosion of the consolidated sediment bed at increased shear stresses e.g. during a storm. There is a need for a new modeling approach that is both fast and accurate. A new erosion formulation is proposed that regards the bed shear stress as a stochastic variable and allows erosion only when the actual bed shear stress exceeds the actual yield strength at the interface. There is a formulation that relates the actual yield strength to the density and the cohesion. In the formula, it is assumed that the potential erosion flux is the same as entrainment flux of fluid mud under turbulent flow. The formulation needs eight physical input parameters. The five shear strength parameters can be determined from standard

consolidation experiments in a settling column as well as soil mechanical tests. The other two physical parameters have to be determined by means of relation concerning to erosion on fluid mud and shear parameter. For the last parameter, namely coefficient of the probability distribution of the bed shear stress, No standardized laboratory tests are yet available and should be estimated during calibration process. The formula has been validated on short term erosion experiments performed in a straight flume on the bed sediments of the junction of Sefidrud dam reservoir and Ghezel Ozan river. These erosion experiments have been performed on the same beds that were measured in the consolidation experiments used to validate the parameterization. In the straight flume seven experiments have been performed. The model can simulate the results from the flume experiment well. The simulations show the same characteristic exponential decay evolution of the eroded material height. Moreover, the model can be calibrated well in a qualitative sense.

Keywords: Cohesive bed erosion, Consolidation, Shear stress, Shear strength, Erosion coefficient rate, Entrainment, Dry density, Calibration

مقدمه

حال تعادل بین اختلاط و نرمی بستر می‌دهد. این مدل تورم بستر را مد نظر قرار داده و فقط برای لایه رسوبی چسبنده یکنواخت با چگالی خشک یکنواخت تعريف شده است. گوینداراجو و همکاران^۸ (۱۹۹۹) مدلی ارائه نموده‌اند که در آن تنش برشی بحرانی تابعی از چگالی خشک بستر در نظر گرفته شده است. جوزن و لیک^۹ (۱۹۹۱) یک مدل عمومی چند لایه توسعه داده اند. سن فورد و ما^{۱۰} (۲۰۰۱) سعی نمودند که تغییرات پیوسته عمقی متغیرهای فرسایش را با استفاده از آنالیز گستردۀ تنایج آزمایش‌های فرسایش در یک فلوم حلقوی تعیین نمایند. آنها سعی کردند که این پروفیل‌های پیوسته را بدون شناخت خصوصیات اندازه‌گیری فرسایش بستر^{۱۱} استخراج نموده اند. بر اساس آخرین تحقیقات به عمل آمده توسط وینترورپ و همکاران^{۱۲} (۲۰۱۲) در آزمایشگاه دلفت هیدرولیک^{۱۳}، فرسایش سطحی زمانی اتفاق می‌افتد که بستر در حالت بحرانی و یا زیر آن قرار داشته باشد. به عبارت دیگر، قبل از اینکه گسیختگی (فرسایش) اتفاق بیفتد، نسبت آب بستر باید افزایش پیدا کند. برای افزایش آب بستر، آب باید وارد بستر شود و در حالت فرسایش سطحی، جریان باید به سطح بستر نفوذ کند. این فرآیند به تورم موسوم است. موقعیت جبهه تورم که با زمان افزایش می‌یابد، تابعی از خصوصیات تورمی رسوبات است که به صورت یک فرآیند فرسایشی قابل تشریح می‌باشد.

رسوبات چسبنده معلق تأثیر قابل توجهی روی افزایش گل آلودگی شاخص‌های کیفی آب گذاشته و باعث کاهش فعالیت بیولوژیکی می‌گردد. ضمن اینکه، تأثیر منفی روی زنجیره غذائی نیز دارد. از طرف دیگر، طبیعت الکترومغناطیسی رسوبات، باعث چسبنده‌گی فلزات سنگین به ذرات رس گردیده و پدیده انتقال و انتشار منجر به پخش و انتقال آنها می‌شود (کاندیاه، ۱۹۷۴). رسوب معلق که منشأ تولید آنها سطح حوزه آبخیز می‌باشد، چندان تحت تأثیر شرایط هیدرولیکی جریان نبوده و در معرض تغییرات شدید نیست. در صورتی که بار رسوب معلق رودخانه که دارای منشأ رودخانه‌ای است، تابعی از توزیع غلظت و نیميخ سرعت می‌باشد (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷). لذا پدیده‌های فرسایش و رسوب گذاری رسوبات چسبنده با منشأ رودخانه‌ای یکی از مهمترین فرآیندها در مدل سازی کیفیت آب محسوب می‌شوند. آزمایش‌های مربوط به پدیده فرسایش بستر، شامل آزمایش‌های فلوم آزمایشگاهی، آزمایش‌های فلوم در محل و مشاهدات میدانی از ۵۰ سال پیش، از زمانی که ایشتن، پارتینیادس^{۱۴} را تشویق به مطالعه رفتار بستر چسبنده نمود، آغاز شد. فرمول فرسایش پارتینیادس (پارتینیادس، ۱۹۶۲ و ۱۹۶۵) و ساده شده آن موسوم به آریاتورای-پارتینیادس (آریاتورای، ۱۹۷۴) هنوز به طور گستردۀ مورد استفاده قرار می‌گیرد. (وینترورپ و ون کیسترن، ۲۰۰۹)- یومش و همکاران^{۱۵} (۲۰۱۰) و احمد و همکاران،^{۱۶} (۲۰۱۱) بعد از پارتینیادس (۱۹۶۲ و ۱۹۶۵)، تحقیقات آزمایشگاهی زیادی در حوزه رسوبات چسبنده انجام داده‌اند. مهتا و همکاران^{۱۷} (۱۹۸۹) مدلی ارائه نموده‌اند که شکل نمائی داشته و فرسایش خالص بستر نرم و تا حدودی تحکیم یافته را تشریح می‌نماید. توسط ون کیسترن و همکاران^{۱۸} (۱۹۹۷) مدلی توسعه داده شده که نرخ فرسایش را در

8 - Govindaraju et al.

9 - Jones and Lick

10 - Sanford and Maa

11 - Lick and Mc Nail

12- Sedflume

13 -Winterwerp et al.

14 - Delft Hydraulics

1 - Kandiah

2 - Partheniades

3 - Ariathurai

4 - Winterwerp and Van Kesteren

5 - Umesh et al.

6 - Mehta et al.

7 - Van Kesteren et al.

$$M = w_e \times C_{gel} \quad (2)$$

در این رابطه، M ضریب نرخ فرسایش، w_e سرعت اختلاط و C_{gel} غلظت ژله‌ای گل روان می‌باشد. برای اعداد ریچاردسون پائین، بین سرعت اختلاط و سرعت برشی رابطه تقریبی زیر برقرار است (کرانبرگ و وینترورپ، ۱۹۹۷) :

$$w_e \approx 0.28 u_* \quad (3)$$

غلظت ژله‌ای C_{gel} نیز تابعی از پارامتر نرخ برشی (G) و بعد فرکتالی (n_f) می‌باشد. پارامتر نرخ برشی به صورت زیر تعریف شده است:

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{v}} \quad (4)$$

در این رابطه، ε نرخ اتلاف انرژی اغتشاشی در واحد جرم و v لزجت سینماتیکی مواد معلق است. رابطه‌ای برای ε توسط نزو و ناکاگاوا، (۱۹۹۳) به صورت زیر پیشنهاد شده است :

$$\varepsilon \approx \frac{u_*^3}{\kappa h} \frac{1 - \frac{z}{h}}{\frac{z}{h}} \quad (5)$$

در این رابطه، u_* سرعت برشی، \square ثابت ون کارمن و z/h نسبی بالای بستر می‌باشد. با جای‌گذاری رابطه (۵) در رابطه (۴)، رابطه‌ای برای پارامتر برشی به صورت تابعی از $G(U, h, z)$ نیز به دست آمده که برای آب صاف ($\square = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) صادق می‌باشد و به صورت زیر است:

$$G = \left(\frac{u_*^3 (h-z)}{z v \kappa h} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

نشان داده شده که متغیر G بین $0.1 s^{-1}$ تا $10 s^{-1}$ تغییرات دارد و فقط برای سرعت در حدود $1 m/s$ و بیشتر، پارامتر برشی مقادیری بیشتر از $10 s^{-1}$ را به دست می‌آورد. شکل (۱) رابطه بین پارامترهای مذکور را نشان می‌دهد که بر اساس معادله ابعاد لخته‌ها توسط وینترورپ و ون کیسترن، (۲۰۰۹) پیشنهاد شده است.

فرمول‌های دیگری نیز وجود دارد که از درجه اعتبار کمتری برخوردارند. به طور کلی هنوز یک مدل عمومی برای فرسایش بستر چسینده شناخته و معرفی نشده و مدل سازی فرسایش هنوز دارای مبانی تجربی می‌باشد. مدل‌های فرسایش موجود، نرخ فرسایش را به صورت تابعی از تنش برشی مازاد بستر و چند ضریب تجربی تعریف کرده‌اند. در این مدل‌ها، تنش برشی مازاد بستر به صورت تنش برشی بستر ناشی از جریان یا موج منهای تنش برشی بحرانی که کمتر از آن فرسایشی اتفاق نمی‌افتد، تعریف می‌شود. ضرائب تجربی نیز از طریق برازش مدل‌ها با آزمایش‌های کوتاه مدت فرسایش تعیین می‌شوند (مهتا و همکاران، ۱۹۸۹).

رویکردها و فرمول‌های جاری برای مسائل کیفیت آب که حداکثرها و تغییرات فصلی غلظت رسوبات اهمیت پیدا می‌کند، از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد. غالب این فرمول‌ها قادر توان تبیین فرسایش رسوبات چسینده در بستر تحکیم یافته در طی وقوع یک سیل و تنش‌های برشی شدید بستر می‌باشند (وینترورپ و همکاران، ۲۰۱۲).

هدف این تحقیق، توسعه و ارزیابی آزمایشگاهی یک فرمول فیزیک مبنای مناسب برای استفاده در مدل سازی بلند مدت کیفیت آب می‌باشد. فرمول جدید پیشنهادی فقط مختص بستر با رسوبات چسینده با درصد رس حاصل ده درصد و با ماسه بسیار اندک است. این فرمول فقط فرسایش سطحی را شامل می‌شود و فرسایش توده ای ناشی از تنش‌های خیلی زیاد را شامل نمی‌شود. از تأثیر فعالیت‌های بیولوژیکی و شیمیایی و گاز نیز در مدل صرف نظر شده است.

مواد و روش‌ها

فرمول پیشنهادی

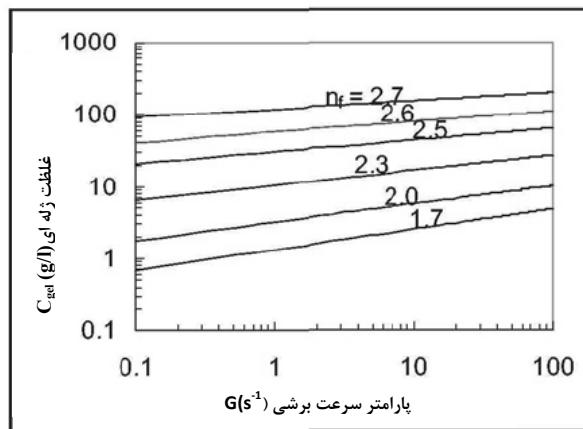
با الگوگیری از مدل‌های موجود، شکل مفهومی مدل پیشنهادی به صورت زیر است:

$$E = M \times p(\tau_0 > \tau_{cr}) \quad (1)$$

در این رابطه، E نرخ فرسایش، M ضریب نرخ فرسایش، p نماد احتمال وقوع تنش برشی، τ_0 تنش برشی لحظه‌ای و τ_{cr} تنش برشی بحرانی برای فرسایش می‌باشد.

ضریب نرخ فرسایش M

در مدل پیشنهادی، متغیر ضریب نرخ فرسایش M توسط نرخ اختلاط گل روان^۱ تعیین می‌شود. یقیناً این متغیر بزرگ‌تر از نرخ اختلاط گل روان نیست. لذا رابطه کلی که می‌توان برای ضریب نرخ فرسایش در نظر گرفت، به صورت زیر است (کرانبرگ و وینترورپ^۲، ۱۹۹۷) :



شکل ۱ - تغییرات غلظت ژله ای C_{gel} نسبت به n_f و G برای شرایط تعادلی (وینتروپ و ون کیستون، ۲۰۰۹)

جدول ۱- مشخصات مدل پیشنهادی تابع توزیع تنش برشی

کشیدگی	چولگی	انحراف معیار	میانه	میانگین	نماینده کاربرد	تابع تجمعی احتمال	تابع توزیع احتمال
$-\frac{6\pi^2 - 24\pi + 16}{(4 - \pi)^2}$	$\frac{2\sqrt{\pi}(\pi - 3)}{(4 - \pi)^{3/2}}$	$\frac{4 - \pi}{2}\sigma^2$	$\sigma\sqrt{\ln(4)}$	$\sigma\sqrt{\frac{\pi}{2}}$	$\sigma \quad x \in [0, \infty]$	$1 - e^{-x^2/2\sigma^2}$	$\frac{x}{\sigma^2} e^{-x^2/2\sigma^2}$

$$\sigma_n = \frac{\sigma}{\tau_y} \quad (9)$$

احتمال وقوع تنشی بیشتر از مقاومت برشی واقعی را به صورت زیر می‌توان به دست آورد:

$$p(x > x_1) = 1 - \int_{x_1}^{\infty} f(x) dx = 1 - \int_{x_1}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} x^2\right) dx \quad (10)$$

$$p(x > x_1) = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} x_1^2\right) \quad (11)$$

$$x_1 = \tau_{y,n} = \frac{\tau_y}{\tau_b} \quad (12)$$

به منظور سادگی بیشتر، اگر متغیر جدیدی به صورت زیر تعریف شود:

$$\beta = \frac{1}{2\sigma_n^2} \quad (13)$$

در نهایت رابطه زیر به دست می‌آید:

تشن برشی لحظه ای در مجاورت بستر مدل پیشنهادی تابع توزیع احتمال تشن برشی، تابع ساده و تک متغیری رایلی^۱ می‌باشد که مشخصات آن به صورت متفاوت‌های مندرج در جدول (۱) تعریف شده است. به منظور استفاده از تابع توزیع رایلی در مدل توزیع تنش برشی، متغیر تصادفی x به صورت بدون بعد زیر بیان می‌شود:

$$x = \tau_{0,n} = \frac{\tau_0}{\tau_b} \quad (7)$$

تشن برشی بستر که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد (τ_b)، الزاماً با میانگین توزیع رایلی برابر نیست و می‌تواند معادل مود یا انحراف معیار نیز باشد. میانگین بدون بعد به صورت نسبت میانگین واقعی تنش‌ها به تشن برشی معمولی بستر به صورت زیر قابل تعریف است :

$$\mu_n = \frac{\mu}{\tau_b} = \sigma_n \times \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (8)$$

نیز متغیر مود (نمای) بدون بعد خواهد بود:

رابطه بینی از زیر توسط مرکلباخ (۲۰۰۰)، برای بارگذاری یکنواخت پیشنهاد شده است:

$$\sigma'_v = K_\sigma \phi^{\frac{2}{3-n_f}} - K_{\sigma,0} \quad (16)$$

K_σ تابعی از انواع خصوصیات میکروسکوپی رسوب چسبنده مقاومت پیوندی، لزجت) می‌باشد. n_f بعد فرکتالی رسوب می‌باشد و مقدار آن بین دو تا سه (مسطح یا کروی) متغیر است. متغیر $K_{\sigma,0}$ مربوط به فرآیند خوش می‌باشد.

در سطح منترک، تنش های مؤثر تقریباً معادل صفر است، بنابراین، ترم تنش مؤثر را می‌توان حذف کرد و خواهیم داشت:

$$\sigma'_v = K_\sigma \phi^{\frac{2}{3-n_f}} - K_{\sigma,0} \approx 0 \Rightarrow K_{\sigma,0} = K_\sigma \phi^{\frac{2}{3-n_f}} \quad (17)$$

با جایگزینی این رابطه، در رابطه مرکلباخ، (۲۰۰۰)، معادله (۱۵) به صورت زیر تغییر می‌یابد:

$$\tau_c = \tau_y = c'_a \phi + \frac{1}{3} \tan \varphi' (1 + 2K_0) K_\sigma \phi^{\frac{2}{3-n_f}} \quad (18)$$

فرمول نهایی پیشنهادی

فرمول پیشنهادی فرسایش سطحی بستر چسبنده به صورت زیر است:

$$E = M \times p(\tau_0 > \tau_y) = M \times \exp \left(-\beta \left(\frac{\tau_y}{\tau_b} \right)^2 \right) \quad (19)$$

$$M = w_{ent.} \times C_{gel}$$

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

نحوه لایه بندی بستر

نیمرخ به دست آمده از آزمایش استوانه تحکیم، باید تبدیل به نیمرخی منفصل برای انجام محاسبات شود. لذا شکر لایه بندی با یک دقت کافی مورد نیاز می‌باشد. فرمول برای مجموعه ای از n مقدار برای n لایه شامل همه اطلاعات متغیرهای مختلف در بستر معرفی می‌شود. خصوصیات وسط لایه‌ها به هر لایه منسوب می‌شوند (شکل ۲).

نمونه گیری میدانی

نمونه رسوبی در خداداد ۱۳۹۰ از بستر مخزن سد سفیدرود جمع آوری شده است. سد سفید رود در ۲۰۰ کیلومتری شمال غربی تهران و ۱۰۰ کیلومتری دریاچه خزر، کمی پائین تر از شهر منجیل و در محل تلاقی دو رودخانه قزل اوزن و شاهرود واقع

$$p(\tau_0 > \tau_y) = \exp \left(-\beta \left(\frac{\tau_y}{\tau_b} \right)^2 \right) \quad (14)$$

می‌توان نشان داد که اگر $\pi / 4 = \beta$ باشد، تنش برشی مورد استفاده معمول (τ_b)، معادل میانگین واقعی (μ) بود و اگر $\beta = 0.5$ تنش برشی مورد استفاده معمول، معادل نما (مود) σ خواهد بود. به طور کلی متغیر β باید بر مبنای برآش داده‌های آزمایشی تعیین شود. قابل ذکر است که با توجه به تأثیر نسبت عرض کانال به عمق آب روی توزیع تنش برشی بستر (تحتی مقدم و لشکرآرا، ۲۰۰۹) متغیر β واسنجی شده در فلوم آزمایشگاه با مقدار آن در محیط آبی طبیعی متفاوت خواهد بود. مزیت توزیع مذکور این است که اجازه اعمال تنش منفی را نمی‌دهد. بنابراین فقط احتمال بیشتر را در یک طرف طیف تنش برشی بستر تعیین می‌شود. این موضوع ارزیابی تابع احتمال بیشتر را ساده‌تر می‌نماید. یک مزیت مهم از توزیع رایلی این است که حاوی فقط یک متغیر است و زمانی که داده‌های از میدان اغتشاش وجود نداشته باشد، فقط یک متغیر باید تعیین شود. این امر احتمال اشتباهات بزرگ را کاهش می‌دهد.

تنش برشی بحرانی فرسایش

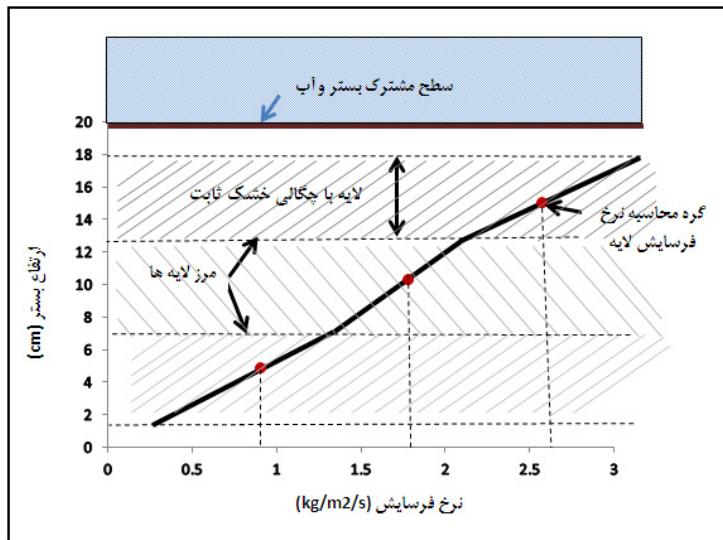
مقاومت برشی واقعی در بستر در نزدیکی سطح تماس بستر و رسوب (τ_y)، معمولاً بزرگتر از تنش برشی بحرانی است. به عبارت دیگر، تنش برشی بحرانی معادل حداقل مقاومت برشی واقعی بستر می‌باشد، ولیکن به دلیل قطعی بودن آن و اندک بودن تغییرات آن در مقایسه با تغییرات تنش برشی به نظر متغیر مناسبی برای جایگزینی تنش برشی بحرانی (τ_{cr} ، رسیده است. مقاومت واقعی برشی بستر را می‌توان به صورت تابعی از چگالی، تنش مؤثر و چسبنده‌گی محاسبه نمود. دست بالا بودن مقدار این متغیر در مقایسه با تنش برشی بحرانی عیب استفاده از این متغیر می‌باشد ولیکن با توجه به دست بالا بودن ضریب نرخ فرسایش می‌توان تاثیر این کاستی را تا حدود زیادی کاهش داد. مرکلباخ، (۲۰۰۰) رابطه‌ای بین غلظت حجمی رسوب \square و مقاومت برشی اصلی (τ_y ، بر حسب خصوصیات میکروسکوپی استخراج نمود:

$$\tau_y = c'_a \phi + \frac{1}{3} \tan \varphi' (1 + 2K_0) K_{\sigma,0} + \tan \varphi' \sigma'_v \quad (15)$$

درین رابطه، c'_a چسبنده‌گی واقعی، \square غلظت حجمی رسوب، φ زاویه اصطکاک داخلی، K_0 ضریب تنش جانبی، $K_{\sigma,0}$ متغیر تجربی پدیده‌های خوش و تورم و σ'_v تنش موثر است.

1- Aspect ratio

2- Merckelbach



شکل ۲ - نحوه لایه بندی و محاسبه نرخ فرسایش در هر لایه



شکل ۳ - نحوه نمونه گیری از رسوب بستر مخزن سد سفید رود

مقداری آب به میزان دو مترمکعب نیز توسط عمل پمپاژ از مخزن سد جهت تأمین آب فلوم آزمایشگاه جمع آوری گردید. ترکیبات کانی شناسی رسوب و سطح ویژه نمونه های رسوبی در چگالی، ظرفیت تبادل یونی و سطح آزمایشگاه جمع آوری گردید. جدول (۲) نشان داده است. دانه بندی ذرات نمونه رسوب نیز در شکل (۴) نشان داده است.

تجهیزات آزمایشگاهی

مجموعه تجهیزات آزمایشگاهی این تحقیق که در شکل (۵) نشان داده شده، شامل چهار بخش اصلی فلوم آزمایشگاهی، مخزن اختلاط رسوب، استوانه تحکیم و کدورت سنج می باشد. فلوم آزمایشگاهی ۱۲ متر طول داشته و دارای امکانات گردش رسوب و تنظیم دبی می باشد. شکل (۶) بازه مشاهداتی انتخاب شده از فلوم را که در ثلث انتهائی آن واقع شده است، نشان می دهد.

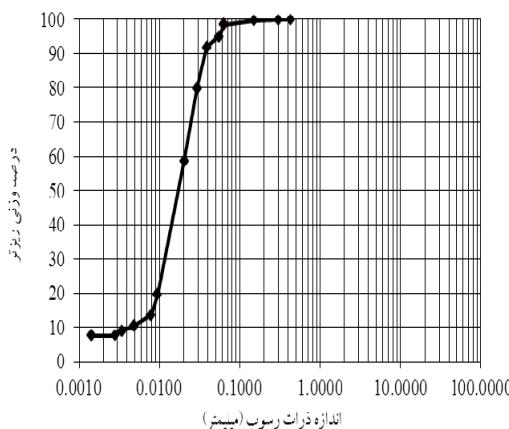
شده است. نمونه های آب و رسوب از محل الحاق رودخانه قزل اوزن و مخزن سد برداشت شده و مختصات آن عبارت است از $y = 4068000$ و $x = 352820$.

کار میدانی با اندازه گیری پروفیل های قائم هدایت الکتریکی، غلظت، درجه حرارت، نسبت اکسیژن، پتانسیل اکسیداسیون و اسیدیته آب آغاز شد. از آنجایی که لایه بندی وجود نداشته است، مقادیر متوسط در عمق ارائه شده اند. عمق آب محلی در طی اندازه گیری ها ده متر بوده و همه اندازه گیری ها با ادوات و ابزار آزمایشگاه کیفی منابع آب موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو انجام شده است. رسوب بستر توسط یک ظرف مخصوص^۱ و از ده سانتی متری فوقانی لایه رسوبی نمونه گیری انجام شد. از این طریق ۲۰۰ کیلوگرم رسوب برداشت گردید. شکل (۳) نحوه نمونه گیری از رسوب را نشان می دهد.

1- Grap Bucket

جدول ۲- ترکیب و خصوصیات کانی شناسی نمونه رسب

نوع کانی	وزنی	درصد	چگالی (kg/m ³)	ظرفیت تبدل	سطح ویژه (m ² /g)	یونی
کلریت	-	۱۰	۲۶۰۰-۲۹۰۰	-	-	-
ایلیت	۲۵	-	۲۶۰۰-۲۸۶۰	۴۰	۸۰	-
کاٹولینیت	۱۵	-	۲۶۱۰-۲۶۴۰	۳-۸	۱۳-۲۶	-
کوارتز	۳۵	-	۲۶۵۰	-	-	-
کلسیت	۹	-	۲۷۲۰	-	-	-
دولومیت	۵	-	۲۸۵۰	-	-	-
مواد آلی	۱	کمتر از	-	-	-	-



شکل ۴- دانه بندی رسبات بستر

طریق لوله مغزه گیری از رسب در وسط استوانه تحکیم بعد از هر دوره زمانی تحکیم انجام گرفت. لوله مغزه گیری بعد از هر دوره تحکیم جهت اندازه گیری چگالی خشک در ترازهای مختلف بستر (هر پنج میلیمتر) به آزمایشگاه منتقل گردید. این کار در شش مرحله مربوط به شش دوره زمانی شش، ۱۴۴، ۷۲، ۴۸، ۲۴ و ۱۶۸ ساعت به نحوی مشابه آنچه که گفته شد، تکرار شد.

آزمایش فرسایش

مراحل مختلف آزمایش، به صورت زیر بود:

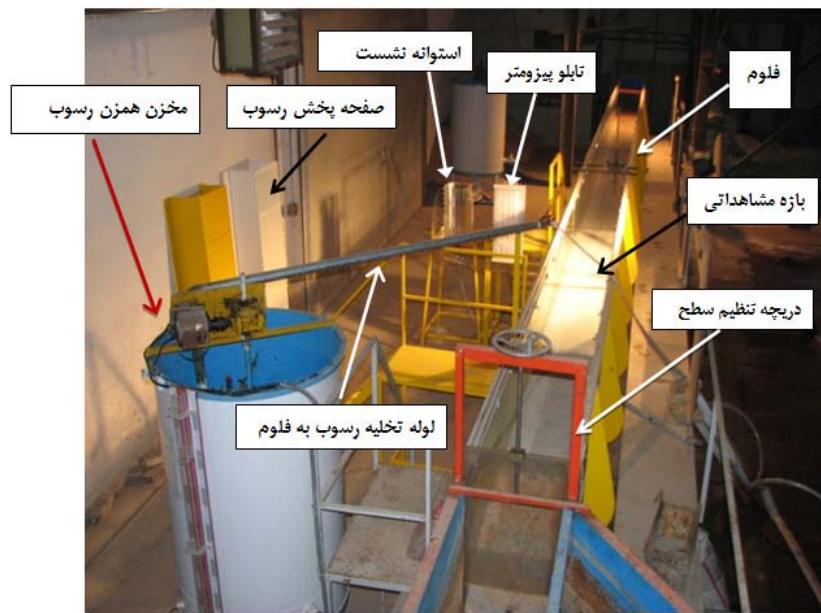
- (الف) ایجاد رسبات معلق کاملاً یکنواخت با غلظت ۵۰ گرم در لیتر با کمک مخزن اختلاط رسب
- (ب) تعییه آب بند در فلوم و دو طرف بازه مشاهداتی به منظور خشک نگه داشتن بازه مشاهداتی
- (ج) پر کردن فلوم آزمایشگاهی تا ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر روی بستر ماسه‌ای با آب مخزن سد

مخزن اختلاط رسب دارای امکانات ایجاد یک مخلوط رسب کاملاً همگن با غلظتی معین و تخلیه رسبات به درون فلوم آزمایشگاهی است. شکل(۷) نمائی از مخزن ۱/۲ متر مکعبی اختلاط رسب را نشان می‌دهد. استوانه تحکیم مورد استفاده از جنس پلکسی گلاس با قطر و بلندای ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد که برای آزمایش‌های تحکیم استخراج پروفیل چگالی خشک و اندازه گیری متغیرهای مربوط به تنش موثر و بعد فرکتالی بکار برد شد. دستگاه کدورت سنج تمامی نیز برای اندازه گیری غلظت رسبات معلق مورد استفاده قرار گرفت.

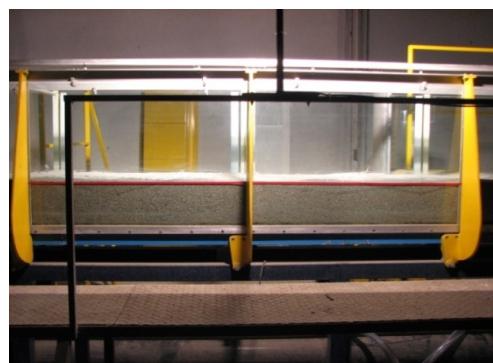
آزمایش‌ها

آزمایش استوانه تحکیم

به منظور ملاحظات عملی، اندازه گیری چگالی خشک در عمق بستر در دوره‌های مختلف تحکیم، در استوانه‌ای جداگانه مورد مطالعه قرار گرفت. کلیه شرایط محیطی آب و رسب در استوانه مشابه فلوم در نظر گرفته شده است. ارتفاع اولیه آب و رسب در استوانه ۳۰ سانتی‌متر و غلظت اولیه ۵۰ گرم در لیتر بود. برای اندازه گیری چگالی خشک، نمونه برداری سراسری عمقی از



شکل ۵- نمای کلی از سامانه آزمایشگاهی



شکل ۶- بازه مشاهداتی به طول دو متر، بلندای ۶۰ سانتی‌متر



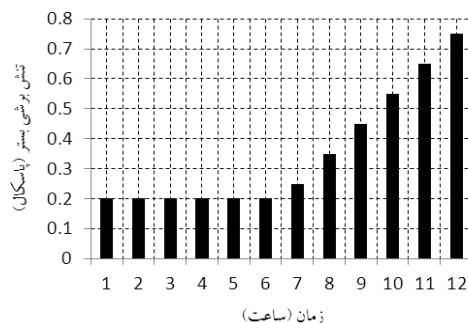
شکل ۷- دستگاه اختلاط آب و رسوب



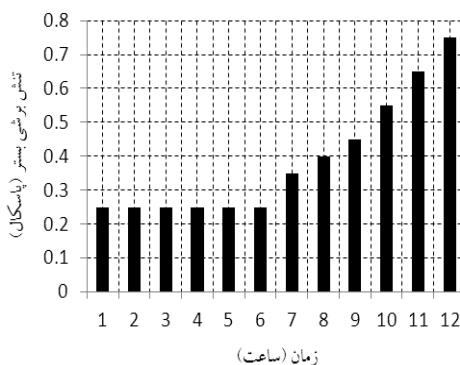
شکل ۸- ایجاد باران رسوی



شکل ۹- آغاز رسوی گذاری در مخلوط آب و رسوی با غلظت ۵۰ گرم در لیتر



شکل ۱۰- تنش برشی اعمال شده در آزمایش مربوط به تحکیم یک روزه



شکل ۱۱- تنش برشی اعمال شده در آزمایش مربوط به تحکیم هفت روزه

شکل(۱)، برای بعد فرکتالی معادل $۲/۳۶$ ، مقدار غلظت ژله ای تقریباً معادل ده تا ۴۰ گرم در لیتر است.

برآورده متغیرهای تنش برشی

برای متغیر β از توزیع احتمالاتی رایلی، مقادیر مختلفی می‌توان در نظر گرفت ولیکن بهتر است مقادیری در نظر گرفته شود که مبین میانگین و یا مود تنش های لحظه ای باشد. به دلیل قطعی نبودن این ضریب و عدم امکان تعیین آن به روش آزمایشگاهی باید در مرحله واستنجی نهایی گردد.

در این تحقیق و برای نمونه های رسوی مورد آزمایش، بعد از واستنجی مقداری معادل $۱/۵$ مناسب ترین نتیجه را داده است. با این مقدار تنش برشی بستر T_b معادل مقدار مود (محتمل ترین مقدار) از تنش برشی واقعی بستر T_0 می باشد.

تعداد لایه ها

بدون تردید در صورت قطعیت کامل مقادیر متغیرهای هشت گانه، نیازی به واستنجی تعداد لایه ها نبود و یقیناً با افزایش تعداد لایه ها دقت نتایج نیز بیشتر می شد ولیکن مقادیر به دست آمده برای متغیرهای فرمول توانم با عدم قطعیت می باشد و با کمک تعداد منظور شده برای لایه ها می توان نتایج مدل را به نتایج آزمایشگاهی نزدیک نمود. بررسی های واستنجی نشان داده که تعداد لایه های محاسباتی نرخ فرسایش و غلظت رسویات باید به میزان ۵۰ لایه برسد.

مقایسه نتایج مدل و مشاهدات

شکل(۱۲) نتیجه مدل و مشاهدات را بعد از یک روز تحکیم نشان می دهد. مدل پیشنهادی، برای یک مجموعه از متغیرهای انتخاب شده، جواب های قابل قبول ارائه کرده است. اشکال (۱۹) تا (۲۰) نتایج تحلیل حساسیت مدل به متغیرها را نشان می دهد.

مدل پیشنهادی به چسبندگی کاملاً حساس می باشد. فقط یک افزایش پنج پاسکالی باعث کاهش جرم فرسایش یافته به میزان یک میلی متر از مواد می شود. اگر چسبندگی صفر شود، فرسایش تقریباً به صورت خطی با نرخ تقریباً معادل (۱۲ \times ۳۶۰۰) / (۲۶۰۰ \times ۱۰ $^{-۳}$) متر 3 /س 4 kg/m 2 /s پیشرفت می نماید. در واقع، خط چسبندگی صفر، مرز بالایی نتایج برای متغیر چسبندگی می باشد. از نتایج مدل برای مقادیر مختلف سرعت اختلاط نتیجه گرفته می شود که نرخ فرسایش تحت تأثیر مستقیم این متغیر می باشد. یک نتیجه مناسب نیز با مقدار $۱\times 10^{-۳} W_e$ متر بر ثانیه به دست می آید.

از نتایج مدل برای مقادیر مختلف بعد فرکتالی می توان دید که فرسایش به این متغیر بسیار حساس می باشد. با کمک نتایج مدل برای مقادیر مختلف متغیرها می توان دید که وقتی K_σ تا $(۸\mathbf{\times} ۱۰^۰)$

(د) پمپاژ و انتقال رسویات متعلق از مخزن به بازه مشاهداتی از طریق ایجاد باران رسوی (شکل ۸)

(ه) رسویگذاری و تحکیم رسویات به میزان دوره تحکیم مورد نظر (شکل ۹)

(و) افزایش دی (به عبارتی دیگر افزایش تنش برشی) به طور پلکانی به صورتی که در شکل (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده، افزایش یافت. تنش برشی بر اساس رابطه هندرسون، (۱۹۶۶) محاسبه شد.

(ز) اندازه گیری غلظت توسط دورت سنج تماسی واستنجی شده در پائین دست بازه مشاهداتی با فاصله زمانی ۱۵ دقیقه اندازه گیری گردید.

نتایج و بحث

برآورده متغیرهای فرمول

هر یک از سه فرمول معرفی شده در فرمول پیشنهادی دارای متغیرهایی هستند که بایستی به نحوی برآورده شوند.

برآورده متغیرهای تنش برشی بحرانی برای فرسایش

فرمول تنش برشی بحرانی پیشنهادی دارای متغیرهای چسبندگی بستر (C)، زاویه اصطکاک داخلی (φ) ، ضریب تنش جانبی (K_σ)، ضریب تنش موثر ($K_{\sigma\sigma}$)، و بعد فرکتالی (n_f) می باشد. با کمک آزمایش های مکانیک خاک انجام شده روی نمونه رسوی مورد مطالعه، زاویه اصطکاک داخلی، درجه و ضریب تنش جانبی در حال سکون با رابطه $(1-\sin\varphi)$ معادل $۰/۶۶$ برآورده شد. مقدار متغیر چسبندگی بستر نیز معادل ۲۰ کیلو پاسکال اندازه گیری شد. برای اندازه گیری ضریب تنش موثر و بعد فرکتالی توسط فولادفر و همکاران (۱۹۹۱) روش پیشنهاد شده است. در این روش با کمک معادله گیسیون (Giesen) و همکاران، (۱۹۶۷) که یک معادله تحکیم یک بعدی در جهت قائم می باشد، در حالت دائمی و ماندگار، $\frac{\partial \square}{\partial t}=0$ می توان متغیرهای مذکور را تعیین نمود. متغیرهایی به دست آمده از این طریق عبارتند از : $K_\sigma=4\times 10^4$ پاسکال و $n_f=2/36$.

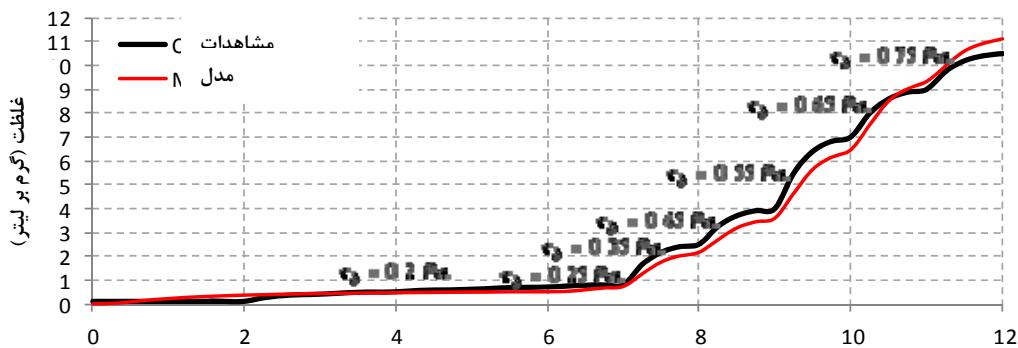
برآورده متغیرهای ضریب نرخ فرسایش

زیر مدل ضریب نرخ فرسایش دارای ضرائب سرعت اختلاط اویله،(W_e) و غلظت ژله ای،(\square_{gel}) می باشد. کرانبرگ و وینتروپ (۱۹۹۷)، سرعت اختلاط لایه گل روان را، هم به صورت عددی و هم به وسیله آزمایش، بررسی کرده اند. آنها دریافتند که مقدار سرعت اختلاط، از مقدار 7×10^{-5} تا 10^{-3} تا 7×10^{-5} تغییرات دارد. آنها برای اعداد ریچاردسون پائین رابطه تقریبی (۳) را پیشنهاد کرده اند (کرانبرگ و وینتروپ ۱۹۹۷). با کمک

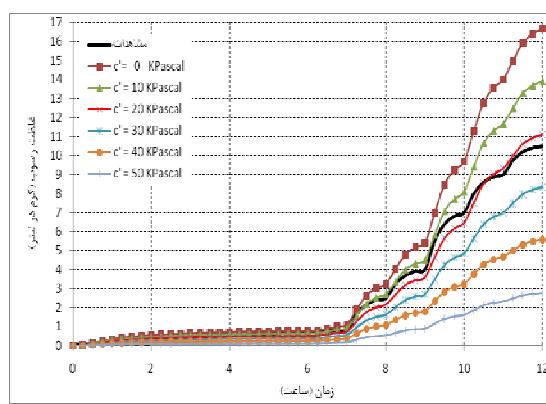
پوشش می‌دهد. در داخل این پوشش‌ها، مدل کاملاً به متغیرهای ژئوتکنیکی حساس می‌باشد.

اگر β کم شود، تنش برشی متوسط بستر به صورت $\mu = 1/2 \times \tau_b \times \sqrt{(\pi/\beta)}$ افزایش می‌باشد و بنابراین نرخ فرسایش افزایش می‌باشد. دو برابر کردن β فرسایش را تقریباً نصف می‌نماید. نتایج مدل برای تعداد لایه‌های متفاوت نشان می‌دهد که فرسایش فقط به میزان ناچیزی تحت تأثیر تعداد لایه‌ها می‌باشد. فقط زمانی که تعداد لایه‌ها خیلی اندک باشد (ده تا ۲۵ لایه)، تفاوت‌ها قابل توجه می‌شوند.

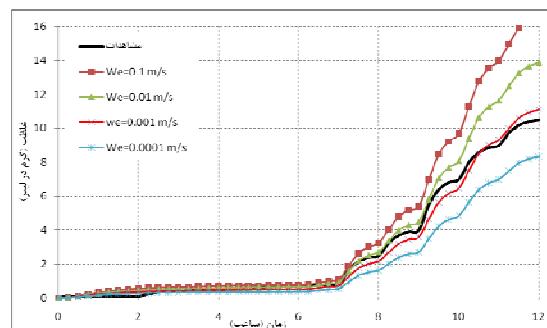
پاسکال، (دو برابر مقدار مرجع K_0 می‌باشد) افزایش می‌باشد، نتایج تحکیم یک و تحکیم هفت روزه تقریباً روی سر هم قرار می‌گیرند. زمانی که مقدار کوچک‌تر K_0 نسبت به مقدار مرجع، به کار می‌رود، مدل اختلافهای بزرگتری بین نتایج تحکیم یک و هفت روزه می‌دهد. از آنجانی که در فرمول پیشنهادی دو متغیر ضریب تنش جانبی و زاویه اصطکاک داخلی در قالب فاکتور $(1+2K_0)\sin\phi'$ در نظر گرفته شده است، به جای متغیرهای مستقل، مقادیر مختلف برای این فاکتور در حساسیت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفته است. حداقل حاصل ضرب به صورت $k_0 = 0.36$ در حالت $\phi' = 40^\circ$ درجه و مقدار $k_0 = 0.30$ در حالت $\phi' = 30^\circ$ درجه حاصل می‌شود. اجرای مدل برای این دو ترکیب نتایج سایر ترکیب‌ها را



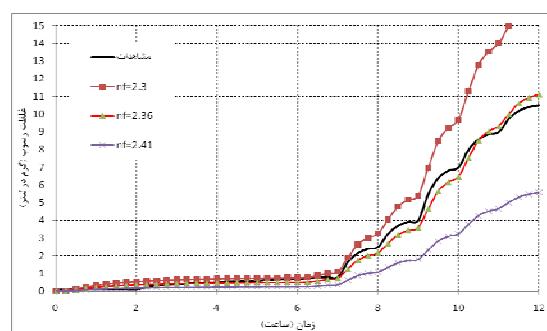
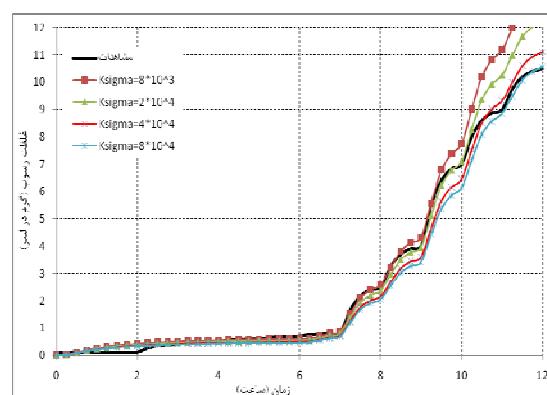
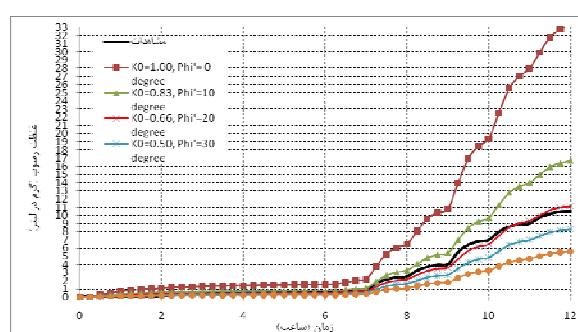
شکل ۱۲ - نتایج فرمول و مشاهدات آزمایشگاهی بعد از یک روز تحکیم



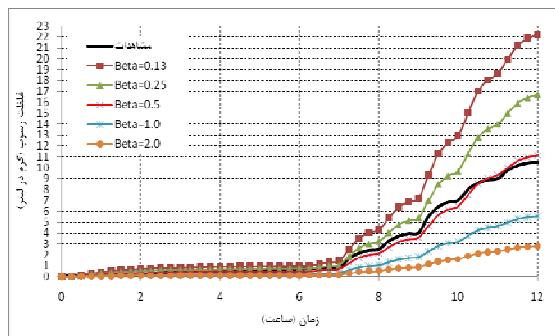
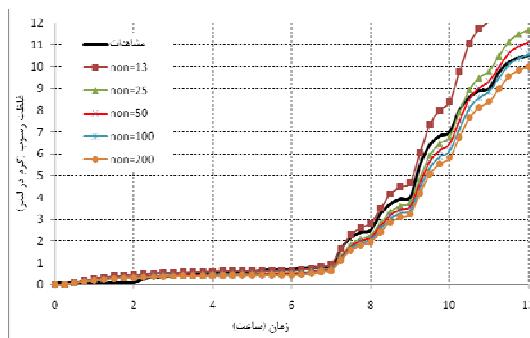
شکل ۱۳ - حساسیت مدل به متغیر چسبندگی



شکل ۱۴- حساسیت مدل پیشنهادی به سرعت اختلاط

شکل ۱۵- حساسیت مدل پیشنهادی به بعد فر کتال n_f شکل ۱۶- حساسیت مدل پیشنهادی به ضریب تنش موثر K_σ 

شکل ۱۷- حساسیت مدل به زاویه اصطکاک داخلی و ضریب تنش جانبی

شکل ۱۸- حساسیت مدل پیشنهادی به ضریب تابع توزیع احتمال β 

شکل ۱۹- حساسیت مدل به تعداد لایه های محاسباتی بستر

میدانی می‌باشد. در این تحقیق، با کمک آزمایش‌ها و استفاده از روش‌های آزمایشگاهی روی رسوبات چسبنده بستر مخزن سد سفید رود برای دوره‌های مختلف تحکیم، متغیرهای فیزیکی مربوط به مدل پیشنهادی، شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب تنش جانی، سرعت اختلاط، غلظت ژله‌ای، ضریب توزیع رایلی، بعد فرکتالی و ضریب تنش موثر برآورد شده‌اند و در گام بعدی مدل عددی بر مبنای لایه بندی بستره برای شرایط مرزی و اولیه آزمایشگاهی، اجرا شده و آنگاه نتایج اجرای مدل با نتایج کارهای آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. در این مقاله نشان داده شده که فرمول پیشنهادی در قالب لایه بندی بستر برآش خوبی به داده‌های آزمایشگاهی دارد. لازم به ذکر است که در این مدل، اثر مواد آلی، فعالیت بیولوژیکی، فرآیندهای شیمیائی و گاز روی رفتار فیزیکی (تحکیم و فرسایش) بستر ملاحظه نشده است. این خصوصیات می‌توانند تأثیر زیادی روی مشخصه‌های فرسایش داشته باشند.

نتیجه گیری

هدف این تحقیق، ارایه یک مدل فیزیک مبنای فرآیندی فرسایش بستر با رسوبات چسبنده برای استفاده در مدل سازی کیفیت آب و ارزیابی آن توسط آزمایش‌های تحکیم و فرسایش بوده است. مدل پیشنهادی هم برای محیط‌های با انرژی پائین (دریاچه‌ها و مخازن) و هم برای محیط‌های با انرژی زیاد (رودخانه‌ها، مصب‌ها، اقیانوس‌ها و نواحی ساحلی) قابل کاربرد می‌باشد. مدل محدود به رسوبات معلم چسبنده با غلظت پائین در حد یک چند میلی گرم در لیتر تا چند صد میلی گرم در لیتر می‌باشد. معمولاً مدل‌هایی که جهت شبیه سازی رفتارهای طبیعی توسعه داده می‌شوند، به دلیل اینکه قادر به توصیف همه رفتارها نبوده و ساده سازی‌های رفتاری در آن اجتناب ناپذیر می‌باشد، حتماً باید مورد ارزیابی قرار گیرند. در یک گام جلوتر، حتی ارزیابی های محدود آزمایشگاهی و منطبق نمودن رفتارهای شبیه سازی شده با نتایج آزمایشگاهی نیز کافی نبوده و نیاز به برداشت‌های میدانی گسترده و طولانی مدت و ارزیابی مدل با نتایج و داده‌های

منابع

- ۱ شفاعی بجستان، م، ۱۳۸۷، "مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب"، دانشگاه شهید چمران اهواز، ویرایش دوم، چاپ اول، ص. ۲۳۷
- ۲ فولادفر، ح، شفاعی بجستان و م، فتحی مقدم، ۱۳۹۱، "بررسی آزمایشگاهی و مدل سازی تنفس برخی بحرانی برای فرسایش سطحی بستر چسبنده"، مجله مهندسی آبیاری و آب، جلد هشتم، صفحات ۷۸ تا ۹۴
- 3- Ahmad, M. F., Dong, P., Mamat, M., Wan Nik, W.B. and M. H. Mohd, 2011. The critical shear stresses for sand and mud mixture. *Applied Mathematical Sciences*: 5:53-71
- 4- Ariathurai, C.R., 1974. A finite element model for sediment transport in estuaries, Ph.D Thesis, University of California, Davis.
- 5- Fathi-Moghadam, M. and B. Lashkar-Ara, 2009. Wall and bed shear forces in open channels. *Research Journal of Physics*, A.J, 4 (1):1-10.
- 6- Gibson, R. E., England, G.L. and M. J. L. Hussey, 1967. The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. *Geotechnique*, 17: 261-273
- 7- Govindaraju, R. S., Ramireddygari, S., Shresta, P. and L. Roig, 1999. Continuum bed model for estuarine sediments based on non-linear consolidation theory. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(3), 300-304.
- 8- Henderson, F.M. 1966. Open channel flow. MacMillan, New York, USA
- 9- Jones, C. and W. Lick. 2001. SEDZLJ sediment transport model. Department of Mechanical and Environmental Engineering, University of California.
- 10- Kandiah, 1974. Fundamental aspects of surface erosion of cohesive soils. Ph.D. Thesis, University of California, Davis
- 11- Kranenburg, C. and J.C. Winterwerp, 1997. Erosion of fluid mud layers, I: Entrainment model. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 123 (6): 504-511
- 12- Lick, W. and J. Mc Neil, 2001. Effects of sediment bulk properties on erosion rates. *The Science of the Total Environment*. 266: 41-48.
- 13- Mehta, A. J., Hayter, E. J. Krone, R. B. and A. M. Teeter. 1989. Cohesive sediment transport, I: Process description. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(8): 1076-1093.
- 14- Merckelbach, L. M. 2000. Consolidation and strength evolution of soft mud layers. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report 00-2, ISSN 0169-6548
- 15- Nezu, I. and H. Nakagawa. 1993. Turbulence in open-channel flows. International Association for Hydraulic Research, Monograph Series, Balkema, Rotterdam.
- 16- Partheniades, E. 1962. A study of erosion and deposition of cohesive soils in salt Water. Ph.D thesis, University of California, Berckley.
- 17- Partheniades, E. 1965. Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE. Vol. 91, No. HY1, pp. 105-139.
- 18- Van Kesteren, W. G. M., Cornelisse J.M. and C. Kuijper. 1997. DYNASTAR BED MODEL: Bed strength, liquefaction and erosion. Rijkswaterstaat and WLdelft hydraulics, Cohesive Sediments, Report No 55.
- 19- Winterwerp, J.C. and W.G.M. Van Kesteren. 2009. Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment. Elsevier, Developments in sedimentology, pp. 110-113.
- 20- Winterwerp, J. C. and Van Kesteren, W. G. M., Van Prooijen, B. and W. Jacobs. 2012, A conceptual framework for shear flow-induced erosion of soft cohesive sediment beds. *Journal of Geophysical Research*, ASCE, 117(91):105-139
- 21- Sanford, L.P. and J.P.Y Maa, 2001. A unified erosion formulation for fine sediments. *Marine Geology*, Vol. 179, pp. 9-23
- 22- Kothyari, U.C and R.K. Jain. 2010. Erosion characteristics of cohesive sediment mixtures. In: Dittrich A, Aberle J, Geisenhainer P (eds) *River Flow 2010*, Bundesanstalt für Wasserbau, pp 815–821.