

## مدل عددی یک بعدی برای شبیه‌سازی رسوبگذاری رسوبات چسبنده ریزدانه در مجاری رو باز

مهدی مفتاح هلقی<sup>۱</sup>، جمال محمد ولی سامانی<sup>۲</sup> و حسین محمد ولی سامانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گروه سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس، <sup>۲</sup> دانشگاه تربیت مدرس، <sup>۳</sup> دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۸۲/۱۰/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۸۳/۵/۲۵

### چکیده

توصیف تفصیلی رفتار رسوبات ریزدانه چسبنده بسیار پیچیده می‌باشد و شبیه‌سازی حرکت رسوبات چسبنده بطور شدیدی وابسته به خواص ماکروسکوپی از سیستم آب - رسوب می‌باشد. در این تحقیق یک معادله یک بعدی رسوبات چسبنده برای رسوبگذاری در معادله انتقال جرم پیشنهاد و این معادله با روش حجم کنترل حل شده و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی واسنجی شده است. آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به عرض ۳۰ سانتی‌متر، شیب ۰/۰۰۰۰۸، دبی جریان بین ۶ تا ۱۲ لیتر بر ثانیه و غلظت‌های ۴ تا ۷ گرم بر لیتر انجام شده است. در مدل پیشنهادی مشخص شد که مقدار رسوبگذاری شدیداً تحت تأثیر پارامترهای غلظت جریان، عمق جریان و نسبت تنش برشی متوسط جریان به تنش برشی آستانه رسوبگذاری می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** رسوبات چسبنده، رسوبگذاری، معادله انتقال - انتشار

### مقدمه

ترکیب رسوبات چسبنده برخلاف رسوبات دانه‌ای، یک ترکیب بسیار پیچیده از کانی‌های متفاوت رس، مواد معدنی و درصد بسیار کمی از سیلت و سایر ترکیبات موجود در داخل آب می‌باشد. توصیف تفصیلی رفتار رسوبات چسبنده یک امر بسیار پیچیده می‌باشد، زیرا رسوبات ریزدانه چسبنده تحت یک سیکل دائمی فرسایش، حرکت انتقالی، انتشار ملکولی و تلاطمی، تفرق، تشکیل خاکدانه، تشکیل کلوخچه، رسوبگذاری و تراکم هستند. هر مرحله از مراحل سیکل رسوبگذاری بطور شدیدی تحت تأثیر خواص دینامیکی سیال، خواص الکتروشمیایی آب - رسوب، ... می‌باشد

(اسکارلاتوس<sup>۱</sup>، ۱۹۸۱). شبیه‌سازی هر یک از مراحل سیکل فرسایش و رسوبگذاری به تنهایی پیچیده است، زیرا یک ذره رسوب زمانی ته‌نشین، زمانی در حرکت و زمانی در تعلیق و گاهی ممکن است در بستر متراکم شده باشد. بنابراین، باید در شبیه‌سازی حرکت رسوبات چسبنده، مساله را با نگرش سیستمی حل کرده و حرکت رسوبات چسبنده را از این دیدگاه بررسی نمود که در هر لحظه از زمان و در یک مقطع مشخص از مسیر حرکت، غلظت حمل رسوب چه مقدار می‌باشد و یا اینکه در این مقطع عمل فرسایش اتفاق می‌افتد یا عمل رسوبگذاری و تغییرات عمق در این حالت چقدر است.



نوس (۱۹۹۴ و ۱۹۹۹)، کرون (۱۹۶۲) و مهتا و پارسنید (۱۹۷۹، ۱۹۸۶) سرعت سقوط را تابعی از غلظت سیال تعریف نموده‌اند ولی با انجام آزمایش‌های متعددی که ماولا (۱۹۹۸) انجام داد، وی سرعت سقوط ذرات چسبیده را به صورت ضربی از سرعت سقوط دانه‌ای غیرچسبیده تعریف نمود. که از قانون استوکس حاصل می‌شود و بطورکلی با ثابت بودن مشخصات سیال، سرعت سقوط ذرات چسبیده را تابعی از قطر آنها تعریف نمود. در مورد ضریب انتشار با پخشیدگی مطالعات محدودی انجام شده است. به‌عنوان مثال، ریدار و واولس (۱۹۹۹ و ۲۰۰۲) ضریب پخشیدگی را تابع عمق جریان و سرعت برشی جریان تعریف نموده‌اند و یا فالكولز ولین (۱۹۹۲) این ضریب را تابعی از لزوجت گردابه‌ای و عدد اشمیت بیان نمودند و پس از ساده کردن روابط، ضریب پخشیدگی را تابع سرعت برشی، عمق جریان و ثابت ون - کارمن بیان کردند و یا هایتز (۱۹۹۵) این ضریب را تابعی از پارامترهای سرعت متوسط جریان، عمق جریان و سرعت برشی جریان تعریف نمود.

برنامه‌های نرم افزاری موجود که کاربرد بسیار زیادی در محاسبات برآورد رسوب دارند نیز براساس معادلات ارائه شده از محققین، ایجاد شده است. به‌عنوان مثال، در برنامه نرم افزاری HEC-6 جمله رسوبگذاری از معادلاتی نظیر کرون (۱۹۶۲) و یا آریا سورای (۱۹۷۴) استفاده شده و یا در برنامه نرم افزاری MIKE-11 و MIKE-21 از معادله پیشنهادی اسکارلاتوس و لای (۱۹۸۱ و ۱۹۹۷) استفاده شده است. همچنین در این نرم افزار ضریب پخشیدگی تابعی غیرخطی از سرعت در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه هر یک از محققین تعداد محدودی از پارامترهای مربوط در پدیده رسوبگذاری و یا ضریب انتشار را در نظر گرفته و روابط خود را ارائه نموده‌اند، بنابراین، در این بررسی جملات ضریب پخشیدگی، سرعت سقوط و معادله رسوبگذاری به صورت تابعی که از آنالیز ابعادی نتیجه شده‌اند، در معادله انتقال - انتشار

مطالعات زیادی در مورد کارهای آزمایشگاهی و همچنین روش‌های حل تحلیلی و حل عددی مختلف برای حرکت رسوبات ریزدانه چسبیده در دو دهه اخیر انجام شده است. تحقیقات زیادی در مورد رسوبات چسبیده و جریان‌های غلیظ در ایران نیز انجام شده است ولی در راستای اهداف این تحقیق، نتایجی ارائه نشده است. مهمترین کارهای انجام شده در مورد استفاده از معادلات ارائه شده برای رسوبگذاری جهت حل عددی معادله انتقال جرم و واسنجی مدل برای استفاده در رودخانه بخصوصی بوده است. همچنین مدل‌های پیشنهادی در برگیرنده پارامترهای محدودی از مشخصات سیال و یا رسوب بوده است. از مدل‌های ارائه شده به‌عنوان مثال می‌توان به مدل رینالدو و همکاران (۱۹۹۹) اشاره نمود که در آن نرخ رسوبگذاری را تابع سرعت سقوط ذرات و غلظت آنها بیان نموده است. اسکارلاتوس و لای (۱۹۹۷) براساس رابطه تعادل جرم در لایه کف و با استفاده از مدل رینالدو، مقدار رسوبگذاری را برحسب تغییر عمق لایه بستر بیان نمودند. اسکارلاتوس و لای (۱۹۹۷) معادله رسوبگذاری را تابعی از سرعت سقوط ذرات، غلظت رسوب، عمق جریان و نسبت تنش برشی بستر به تنش برشی آستانه رسوبگذاری بیان کردند و این معادله در واقع الهام گرفته از معادله کرون (۱۹۹۹) است که رسوبگذاری را تابع پارامترهای سرعت سقوط، غلظت رسوب و نسبت تنش برشی بستر به تنش برشی آستانه رسوبگذاری تعریف کرده بود.

بررسی روابط بطورکلی نشان می‌دهد که رسوبگذاری زمانی انجام می‌شود که تنش برشی متوسط جریان که به بستر وارد می‌شود، کمتر از تنش برشی آستانه رسوبگذاری باشد که مقدار تنش برشی آستانه رسوبگذاری در آزمایش‌های محققین به صورت یک عدد مشخص و یا در دامنه‌ای از اعداد تعریف شده است.

از دیگر موارد مهم تحلیل جریان رسوبات چسبیده، تعیین سرعت سقوط و همچنین ضریب پخشیدگی معادله انتقال جرم می‌باشد. تعدادی از محققین مانند کانسیو و



(۳)

$$D_e = A_3 \left( \frac{\rho V}{H} \right) \left( \frac{V I}{H} \right)^{B_1} \left( \frac{\rho V \cdot H}{\mu} \right)^{B_2} \left( 1 - \frac{\tau}{\tau_d} \right)^{B_3} C^{B_4} \left( \frac{V}{\omega_s} \right)^{B_5} \left( \frac{\rho_s}{\rho} \right)^{B_6} \left( \frac{V^2}{gH} \right)^{B_7} \left( \frac{H}{D_s} \right)^{B_8}$$

که در آنها جمله  $\frac{V I}{H}$  عدد استرووال،  $\frac{\rho V \cdot H}{\mu}$  عدد رینولدز جریان،  $\frac{V^2}{gH}$  مجذور عدد فرود جریان و  $\frac{\tau}{\tau_d}$  نسبت تنش برش متوسط جریان به تنش برش آستانه رسوبگذاری می‌باشد. همچنین ضرایب  $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7, B_8$  ضرایب مجهولی هستند که در واسنجی مشخص می‌شوند. مقادیر فوق در معادله انتقال جرم که به صورت زیر می‌باشد، قرار گرفته و سپس با روش عددی حجم کنترل این معادله در گام‌های زمانی و مکانی مختلف حل شده است.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + V \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right) - D_e \quad (4)$$

پس از حل معادله دیفرانسیل فوق، مقادیر غلظت رسوب در هر مقطع زمانی و مکانی محاسبه شده و سپس با تبدیل واحد به مقادیر دبی رسوب تبدیل شده است. با جایگزینی مقادیر دبی رسوب در معادله پیوستگی رسوب که به صورت زیر تعریف شده است، مقادیر ضخامت لایه بستر ناشی از رسوبگذاری در مقاطع مورد نظر محاسبه شده است:

$$B \frac{dz}{dt} + \frac{1}{1-n} \frac{dQ_s}{dx} = 0 \quad (5)$$

که در آن  $B$  عرض مقطع جریان،  $Z$  ضخامت لایه بستر،  $t$  زمان،  $n$  تخلخل دانه‌های رسوبی و  $Q_s$  دبی رسوب می‌باشد.

در پایان برای تعیین ضرایب مجهول معادلات از برنامه بهینه‌سازی ریاضی استفاده به‌عمل آمده است. اساس بهینه‌سازی کمینه کردن تابع زیر بوده است:

$$\min \left[ \frac{\sum (Z_o - Z_e)^2}{N} \right]^{1/2} \quad (6)$$

که در آن  $N$  تعداد داده،  $Z_o$  ضخامت بستر مشاهده‌ای و  $Z_e$  ضخامت بستر محاسبه‌ای می‌باشد. در بهینه‌سازی به ازاء یک مقدار اولیه برای ضرایب مجهول، مقادیر

قرار گرفته و در حد مقذور سعی شده است که بیشتر پارامترهای مهم در این پدیده‌ها مشخص شده و مورد استفاده قرار گیرد. در تحقیق حاضر با تهیه یک مدل ریاضی که اساس آن معادله انتقال جرم یا معادله انتقال - انتشار (پخشیدگی) می‌باشد و یا پیشنهاد یک جمله به‌عنوان معادله رسوبگذاری در جمله منبع این معادله، مدل ریاضی حل شده و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، ضرایب بهینه معادله پیشنهادی با اعمال بهینه‌سازی ریاضی واسنجی شده است.

### مواد و روش‌ها

براساس مطالعات و نتایج آزمایشگاهی سایر محققین و همچنین با توجه به شرایط جریان با سطح آزاد، پارامترهای مربوط در جملات رسوبگذاری، سرعت سقوط ذرات و ضریب پخشیدگی به صورت زیر لحاظ گردیده است:

- ضریب پخشیدگی ( $D$ ) که در واقع ضریب انتشار تلاطمی است تابعی است از پارامترهای سرعت جریان ( $V$ )، عمق جریان ( $H$ )، سرعت برشی جریان ( $u_*$ )، دانسیته سیال ( $\rho$ ) و لزوجت سیال ( $\mu$ )

- سرعت سقوط ذرات ( $\omega_s$ ) براساس نظر ماولا (۱۹۹۸) به صورت تابعی از قطر ذرات رسوبی ( $D_s$ ) می‌باشد.

- جمله رسوبگذاری ( $D_e$ ) تابعی است از پارامترهای چگالی سیال ( $\rho$ )، چگالی ذرات رسوبی ( $\rho_s$ )، قطر ذرات رسوب ( $D_s$ )، زمان ( $t$ )، لزوجت سیال ( $\mu$ )، سرعت جریان ( $V$ )، غلظت رسوب ( $C$ )، شیب کف آبراهه ( $S$ )، عمق جریان ( $H$ )، شتاب ثقل ( $g$ ) و تنش برشی آستانه رسوبگذاری ( $\tau_d$ ).

با استفاده از روش آنالیز ابعادی و تشکیل گروه‌های بدون بعد و همچنین ترکیب برخی گروه‌های بدون بعد با یکدیگر، معادلات پیشنهادی به صورت زیر نتیجه شده است:

$$D = A_1 (V \cdot H) \left( \frac{U_*}{V} \right)^{B_1} \left( \frac{\rho \cdot V \cdot H}{\mu} \right)^{B_2} \quad (1)$$

$$\omega_s = A_2 \cdot D_s^{B_3} \quad (2)$$



مقادیر عمق ته‌نشین رسوبات چسبیده در هر آزمایش پس از زمان یک ساعت در فواصل ۲، ۴، ۶، ۸ متری از ابتدای کانال اندازه‌گیری شده است. بنابراین در آزمایش‌ها مقادیر قطر دانه‌های رسوب، غلظت رسوب ورودی در زمان‌های جزئی، دبی جریان عمق جریان و عمق بستر مشاهده‌ای در فواصل ۲ متری به صورت ماتریس تعریف و وارد برنامه شده است و حل معادله انتقال جرم و تکرار آن برای هر آزمایش براساس مقادیر ماتریس مذکور انجام شده است.

### نتایج و بحث

در تهیه مدل‌های عددی و واسنجی مدل، ابتدا باید صحت کار مدل مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور حالت‌های مختلف از جمله غلظت ورودی صفر و یا مقایسه نتایج مدل با حل تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. در مورد غلظت ورودی صفر، نتایج مدل به صورت غلظت خروجی صفر و تغییر لایه بستر صفر بوده است. به‌طور عمده حل‌های تحلیلی براساس حل معادله انتقال جرم در حالت فاقد جمله منبع می‌باشند و تنها در حالتی خاص، با جایگذاری مدل اسکارلاتوس حل شده است (۱۹۹۷). مقایسه حل تحلیلی با مدل تهیه شده در حالتی که از جمله منبع صرف‌نظر شده باشد، هماهنگی بسیار خوبی را نشان می‌دهد. حل تحلیلی معادله انتقال جرم توسط اوگاتا (ژنگ و بنت<sup>۱</sup>، ۱۹۹۵) پیشنهاد شده و اساس معادله آن به شرح زیر است:

(۷)

$$C(t) = \frac{C_0}{2} \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{x-vt}{\sqrt{4Dt}}\right) + \exp\left(\frac{xv}{D}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x+vt}{\sqrt{4Dt}}\right) \right]$$

که در آن  $t$  زمان،  $v$  سرعت،  $x$  موقعیت مکانی،  $D$  ضریب انتشار و  $C_0$  غلظت در زمان صفر و  $C(t)$  غلظت در پایان زمان  $t$  می‌باشد. در مقایسه حل تحلیلی با حل عددی، با فرض  $D = 1 \text{ m}^2/\text{day}$ ،  $v = 1 \text{ m/s}$ ،  $C_0 = 1 \text{ gr/lit}$  و  $t = 3600 \text{ sec}$

غلظت و سپس ضخامت لایه بستر در پایان گام زمانی و در مقطع مورد نظر محاسبه شده ( $Z_0$ ) و تفاضل این مقدار با ضخامت لایه بستر که از مشاهدات آزمایشگاهی حاصل شده است ( $Z_0$ )، کمینه شده است.

در انجام عمل بهینه‌سازی ریاضی با توجه به اینکه ممکن است اختلاف تعدادی از مقادیر محاسباتی و مشاهداتی بسیار اندک بوده ولی اختلاف در تعدادی از نقاط زیاد باشد و در مجموع خطای متوسط مقدار بالایی نشود، در نتیجه علاوه بر کمینه نمودن تفاضل عمق لایه بستر مشاهداتی و محاسباتی، ضرائب همبستگی بین مقادیر نیز کنترل شده است، یعنی همزمان با کمینه نمودن تفاضل مقادیر، سعی در بیشینه نمودن ضریب همبستگی بین مقادیر بوده است.

در تحقیق حاضر پس از انتخاب گام زمانی ۰/۱ ساعت و گام مکانی یک متر، زمان کل یک ساعت و طول بازه ۱۰ متر، معادله انتقال جرم، با انتخاب ضرائب مجهول در حالت ضمنی حل شده و عمل بهینه‌سازی با روش تک تغییری انجام شده است.

به‌منظور واسنجی مدل، ۲۷ سری آزمایش روی نمونه‌های رسوب انجام شده که با انتخاب ۳ قطر ۳۹، ۵۷ و ۷۱ میکرون، ۳ دبی جریان ۶، ۹، ۱۲ لیتر بر ثانیه و ۳ غلظت جریان ۴، ۵/۵ و ۷ گرم بر لیتر انتخاب شده است. فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده دارای عرض کف ۰/۳ متر و طول ۱۰ متر بوده است. رسوبات ابتدا در یک مخزن زمینی مخلوط و با انتقال به یک مخزن هوایی، وارد سیستم کانال می‌شده است. عمل اختلاط در مخزن در طول انجام آزمایش‌ها به‌صورت دائم انجام شده است (آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است). غلظت ورودی به کانال در گام‌های زمانی مختلف اندازه‌گیری شده و در حل معادله انتقال جرم، هیدروگراف غلظت ورودی به کانال مورد نظر بوده است. همچنین مقادیر دبی نیز در هر آزمایش ۳ بار اندازه‌گیری و مقدار متوسط آن به‌عنوان دبی جریان در نظر گرفته شده و محاسبه‌ها بر این مبنا انجام شده است.



$$D_c = K \frac{V^{1.111} C_f^{0.05}}{H^{0.95} D_s^{0.0402}} \left(1 - \frac{T}{T_d}\right)^{1.3} \quad (10)$$

که در آن  $K$  ضریب ثابت می‌باشد. لازم به ذکر است که به دلیل حساسیت بسیار جزئی عدد فرود و اینکه چگالی نسبی ذرات ثابت می‌باشند، این جملات از بهینه‌سازی حذف و تأثیر آن در ضریب ثابت لحاظ گردیده است.

در تحلیل حساسیت مدل مشخص گردید که توان جملات غلظت و نسبت تنش برشی جریان به تنش برشی آستانه رسوبگذاری از حساسیت بیشتری نسبت به سایر ضرائب برخوردار است. در مقایسه با مدل پیشنهادی اسکارلاتوس (۱۹۹۷) که به صورت زیر می‌باشد (معادله ۱۱)، مشاهده می‌شود که در هر دو مدل جملات غلظت رسوب، نسبت تنش برش به تنش برش آستانه رسوبگذاری و عمق جریان مهمترین پارامترهای جمله رسوبگذاری می‌باشند.

$$D_c = \frac{w_s C}{H} \left(1 - \frac{T}{T_d}\right) \quad (11)$$

نتایج تحلیل حساسیت برای تعدادی از پارامترها که حساسیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها داشتند، در جدول ۲ درج شده است. در این جدول به ازای تغییرات ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۵۰ درصد ضرایب، مقادیر تغییر خطای استاندارد معادله ۶ و ضریب همبستگی ارائه شده است.

یک ساعت در فاصله ۲۰۰ متری با گام مکانی ۲۰ متر محاسبه گردید که نتایج با مدل تهیه شده هماهنگی بسیار خوبی نشان داده است. مقایسه نتایج برای نقاط اولیه در جدول ۱ ارائه شده است.

جهت واسنجی مدل، ابتدا داده‌های حاصل از ۱۴ آزمایش (از مجموع ۲۷ آزمایش) که در هر آزمایش داده‌های ۴ نقطه اندازه‌گیری شده است، انتخاب و ضرائب مدل با عمل بهینه‌سازی ریاضی به دست آمد که نتیجه آن به شرح زیر است:

(۸)

$$D_c = 0.0023 \left(\frac{\rho V}{H}\right) \left(\frac{V_d}{H}\right)^{0.05} \left(\frac{\rho V H}{\mu}\right)^{0.06} \left(1 - \frac{T}{T_d}\right)^{1.3} (C) \left(\frac{V}{\omega_s}\right)^{0.001} \left(\frac{H}{D_s}\right)^{0.04}$$

که پس از ساده کردن به صورت زیر خواهد بود:

$$D_c = \frac{0.0023 \rho^{1.06} V^{1.111} C_f^{0.05}}{H^{0.95} \mu^{0.06} w_s^{0.001} D_s^{0.04}} \left(1 - \frac{T}{T_d}\right)^{1.3} \quad (9)$$

در بهینه‌سازی سرعت سقوط ذرات رسوبی براساس پیشنهاد ماولا که تابعی از قطر ذرات است، به صورت  $w_s = 0.0003 D_s^{0.2}$  به صورت  $w_s = 0.00025 D_s^{0.2}$  بوده است و نتایج تقریباً یکسانی حاصل گردید. با توجه به ثابت بودن  $\rho$  و  $\mu$  و اینکه سرعت سقوط تابعی از قطر ذرات است می‌توان رسوبگذاری را بصورت معادله زیر خلاصه نمود.

جدول ۱- مقایسه غلظت جریان در نتایج روش‌های عددی و حل تحلیلی به روش اوگاتا به گرم در لیتر.

X	۰	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	۱۲۰	۱۴۰	۱۶۰	۱۸۰	۲۰۰
حل تحلیلی	۱	۰/۹۹۸	۰/۹۹۳	۰/۹۸۶	۰/۹۶۷	۰/۹۳۱	۰/۸۶۱	۰/۷۳۶	۰/۶۲۴	۰/۵۰	۰/۳۷۵
حل عددی	۱	۰/۹۹۰	۰/۹۷۹	۰/۹۶۱	۰/۹۳۸	۰/۹۲۰	۰/۹۹۰	۰/۷۷۵	۰/۶۸۴	۰/۵۷۰	۰/۴۶۱



جدول ۲ - آنالیز حساسیت برخی از پارامترها.

پارامتر	درصد تغییرات پارامتر	+ ٪۵	- ٪۵	+ ٪۱۰	- ٪۱۰	+ ٪۱۵	- ٪۱۵	+ ٪۲۰	- ٪۲۰	+ ٪۵۰	- ٪۵۰
B1	درصد تغییر خطای نسبی	+۰/۲۴	+۰/۵۳	+۰/۲۸	+۲/۱۱	+۰/۲۹	+۲۸/۲۷	+۰/۳۰	+۱۰۸	+۰/۳۰	+۵۳۳
	درصد تغییر ضریب همبستگی	+۰/۲۴	-۱/۱۵	+۰/۲۷	-۶/۳۷	+۰/۲۹	-۲۸/۶	+۰/۲۹	-۷۷/۷	+۰/۲۹	-۱۶۴
B2	درصد تغییر خطای نسبی	+۰/۲	+۰/۲۷	+۳۲/۱	+۰/۲۸	+۱۸۱	+۰/۲۹	+۳۸۱	+۰/۲۹	+۴۳۴	+۰/۲۹
	درصد تغییر ضریب همبستگی	-۲/۹۹	+۰/۲۸	-۳۱/۵	+۰/۲۹	-۱۰۴	+۰/۲۹	-۱۳۸	+۰/۲۹	-۱۷۹	+۰/۲۹
B5	درصد تغییر خطای نسبی	+۳/۲۴	+۵/۰۴	+۱۴/۳۸	+۱۶/۸۸	+۳۱/۵۴	+۳۳/۲	+۵۲/۷	+۵۲/۲	+۲۰۴	+۱۷۱
	درصد تغییر ضریب همبستگی	-۰/۰۴	-۱۳۰	-۰/۰۷	-۰/۳۸	-۰/۰۸	-۰/۷۸	-۰/۲۲	-۱/۳۶	-۱/۵۸	-۱۳/۷
B7	درصد تغییر خطای نسبی	+۱۸/۰۲	+۳۴/۸	+۷۶/۱	+۸۹/۶	+۱۴۶	+۱۴۵	+۲۱۷	+۱۹۵	+۳۶۶	+۵۰۷
	درصد تغییر ضریب همبستگی	-۰/۴۶	+۰/۵۳	-۰/۸۳	+۱/۱۲	-۱/۱۱	+۱/۷۷	-۱/۲۷	+۲/۴۷	-۱/۴	+۳/۹۸

اطمینان ۹۹ درصد میانگین جامعه خطاها می‌بایست بین مقادیر ۰/۰۰۰۲۱۸ و ۰/۱۳۶... باشد یعنی خطاهای نتیجه شده در سطح کمتر از ۱ درصد قابل قبول است. همچنین رابطه به‌دست آمده برای ضریب پخشیدگی به صورت زیر نتیجه گردید:

$$D = 100(V.H)\left(\frac{V}{u_*}\right)^{-1.15} \left(\frac{\rho V.H}{\mu}\right)^{0.55} \quad (12)$$

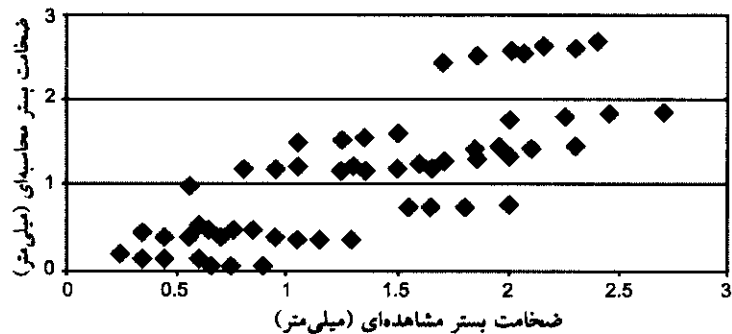
و یا

$$D = 100 \frac{V^{0.4} H^{1.55} U_*^{1.15}}{\nu^{0.55}} \quad (13)$$

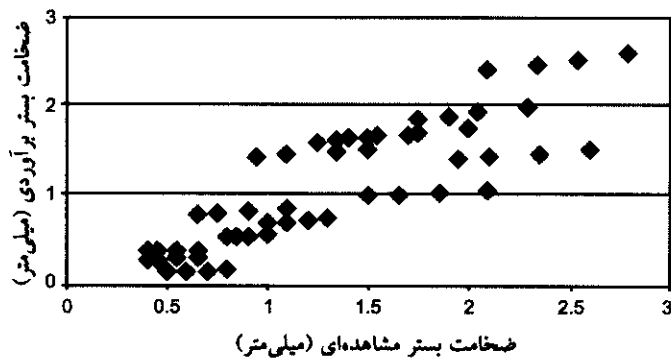
در مدل پیشنهادی ریدر و اولس (۱۹۶۵ و ۱۹۹۹) به صورت  $D = U_* H$  و یا معادله فالكونر (۱۹۹۲) به صورت  $D = 0.25k(U_* H)$  (k ثابت فن-کارمن بوده و معادل ۰/۴ می‌باشد) که با نتایج این مدل تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد.

در بهینه‌سازی متوسط خطای به‌دست آمده براساس معادله ۶ برابر ۰/۰۰۰۵۳ متر و مقدار نسبی آن ۰/۴۲ و ضریب همبستگی بین ضخامت‌های بستر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای ۰/۷۹۸ به‌دست آمده است. رابطه بین ضخامت بستر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای در شکل ۱ ترسیم شده است. قابل ذکر است که ضریب همبستگی برای تعداد ۵۶ نمونه (۱۴ آزمایش و ۴ نقطه در هر آزمایش) در سطح ۰/۰۵ و ۰/۱ به ترتیب برابر ۰/۲۶۱ و ۰/۳۳۸ می‌باشند بنابراین، این رابطه با اطمینانی بیش از ۹۹ درصد قابل قبول است. همچنین آزمون خطاها نشان می‌دهد که خطاهای موجود بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه‌ای برای ۵۶ نمونه در سطح کمتر از ۱ درصد قابل قبول است. همچنین متوسط قدر مطلق خطاها (تفاضل مقادیر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای) برای ۵۶ نمونه ۰/۰۰۰۰۳۸ متر با انحراف معیار ۰/۰۰۰۵۰۴ متر نتیجه شد که در سطح





شکل ۱ - رابطه بین ضخامت بستر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای در مرحله واسنجی.



شکل ۲ - رابطه بین ضخامت بستر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای پس از بهینه‌سازی.

محاسبه‌ای و مشاهده‌ای  $0/820$  و مقدار خطا از رابطه ۶  $0/00048$  متر و مقدار نسبی آن  $0/38$  نتیجه گردید. به‌منظور مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با سایر مدل‌ها، از مدل اسکارلاتوس و لای (۱۹۹۷) که کاربرد بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد، استفاده شد. اسکارلاتوس رابطه بین ضخامت لایه بستر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای را براساس آزمایش‌های خود به صورت شکل‌های ۳ و ۴ ارائه نموده است. با این همه، با جایگزین کردن رابطه وی در معادله انتقال - انتشار و حل عددی این معادلات، خطای رابطه به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش و همچنین ضریب همبستگی به مقدار فاحشی کاهش یافته است. نتایج حاصله براساس ۱۰۸ نمونه به صورت زیر بوده است:

به‌منظور ارزیابی و اطمینان از دقت رابطه فوق، با انتخاب ضرایب به‌دست آمده از بهینه‌سازی و داده‌های پایه ۱۳ آزمایش دیگر، ضخامت لایه بستر برای تعداد ۵۲ نقطه (۱۳ آزمایش و ۴ نقطه در هر آزمایش) محاسبه و نتایج با مشاهدات مقایسه گردید. در این حالت خطا براساس معادله ۶ برابر  $0/00029$  متر و مقدار نسبی آن  $0/4$  و ضریب همبستگی بین ضخامت‌های بستر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای  $0/942$  نتیجه شد که این ضریب با اطمینانی بیش از ۹۹ درصد قابل قبول است. رابطه بین عمق‌های بستر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای در این حالت در شکل ۲ نشان داده شده است.

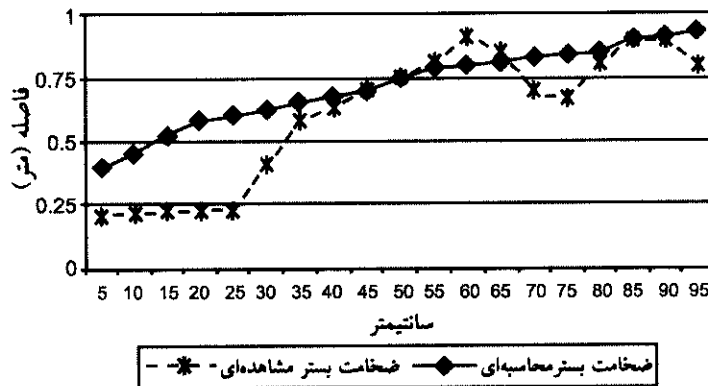
دوباره با اعمال ضرایب بهینه ضریب همبستگی و خطا برای تمامی داده‌ها (۱۰۸ نقطه) محاسبه شد که در این حالت ضریب همبستگی بین ضخامت بستر

پارامتر	خطا معادله (۶) (متر)	خطای نسبی	ضریب همبستگی (R)
مدل پیشنهادی	$0/00048$	$0/38$	$0/820$
مدل اسکارلاتوس	$0/0016$	$2/93$	$0/360$

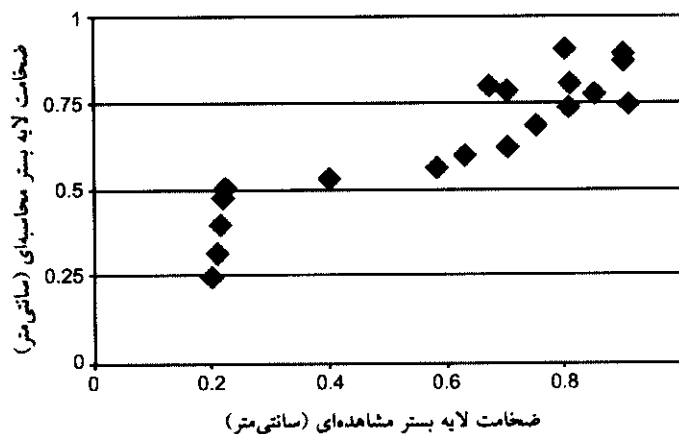


شرایطی است که امکان اندازه‌گیری ضخامت رسوبات ته‌نشینی در شرایط قطعی بسیار پیچیده و یا حتی غیرممکن می‌باشد. در نتیجه، می‌توان با استفاده از این معادلات، برآوردهای نسبتاً مناسبی از بار رسوبی رودخانه‌ها و شرایط تغییر ضخامت بستر آنها را برآورد نمود.

بنابراین، می‌توان از مدل پیشنهادی که در مقایسه با مدل‌های دیگر، ضمن اینکه در برگیرنده اکثر پارامترهای مهم جریان و رسوب می‌باشد، با اطمینان بهتری استفاده و رسوبگذاری را برآورد نمود. لازم به ذکر است مدل‌هایی که براساس شرایط آزمایشگاهی و اسنجی می‌شوند، تعمیم آنها به شرایط واقعی همراه با خطا خواهد بود و این در



شکل ۳ - مقایسه ضخامت لایه بستر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای براساس مدل و داده‌های اسکارلاتوس.



شکل ۴ - رابطه بین ضخامت لایه بستر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای براساس مدل و داده‌های اسکارلاتوس.

### منابع

1. Ariathurai, R.A. 1974. Finite element model for sediment transport in estuaries. Ph.D The sis, Dept. of Civil Eng., Univ. of California, Davis: p77-103
2. Cancio, L., and R. Neves. 1994. 3D-numerical modeling of cohesive sediment in Weterm Scheldt estuary. Netherlands Journal of Aquatic Ecology No.28:337-345
3. Cancio, L., and R. Neves. 1999. Hydrodynamic and sediment suspension modeling in estuarine system. Journal of Marine System, No.22:105-116
4. Falconer, E.J., and R. Peigoard. 1992. Mechanics of coastal sediment transport Advanced series on ocean Eng., World scientific, New Jersey, Vol 3: 57-66



5. Hyter, E.J. 1995. A Finite element model for depth - averaged: hydrodynamics, sediments and contaminant transport (HSCTM-2D) Software, US. Environmental protection agency. Athens, Georgia: 21-87
6. Krone, R.B. 1962. Flume studies of transport of sediment in estuaries shoreline process. Final report, Hydraulic Eng. lab Univ. Of California, Berkeley: 5-41
7. Krone, R.B. 1999. Effects of bed structure on erosion of cohesive sediment. Journal of Hydraulic Eng. Vol.12: 1297-1301
8. Mawla, A.S. 1998. Deposition and bed density development of cohesive sediment under waves, Ph.D. Thesis, Civil Eng. Dept. Faculty of Eng. Suez Canal Univ.:24-41
9. Mehta, A.J., and E. Partheniades. 1979. Kaolin it resuspension properties, Tech. Note. Proc. ASCE, vol 105: 14477.
10. Mehta, A.J. 1986. Characteristion of sediment properties and transport process in estuaries. Tech. Note Proc. 14-spring, Verlag Berlin: 240-325
11. Patankar, S.V., 1965. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere. pub. London: 79-135
12. Reidar, N., and B., Olsen. 1999. Computational fluid dynamics in hydraulic and sedimentation Eng. Dep. of Hydraulic and Environmental Eng. University Press: 3-17
13. Reidar, N., and B., Olsen. 2002. A 3-Dimensional numerical model for simulation of sediment movement in water intakes with multiblock option Dept of hydraulic and environmental Eng. University Press.: 5-17.
14. Reinaldo, G.M., I., boavedra, and C., Villoria. 1999. A 2-Dimensional computational model to simulate suspended sediment transport and bed changes. Journal of Hydraulic Eng. Vol. 37:327-344.
15. Scarlates, P.D. 1981. On the numerical modeling of cohesive sediment transport. Journal of Hydraulic research. Vol.19, No. 1:61-68
16. Scarletes, P.D., and Li. 1997. Analysis of fine-grained sediment movement in small canal. Journal of Hydraulic Eng. Vol. 18: 200-207
17. Zheng, C., and G., Bennet. 1995. Applied contaminant transport modeling. Van No strand Reinhold pub: 91-178



---

---

## **A 1-D numerical model for simulation of fine – grain cohesive sediment deposition in open channels**

**<sup>1</sup>M.Meftah Halaghi, <sup>2</sup>J. Mohammad Vali Samani and <sup>3</sup>H. Mohammad Vali Samani**

<sup>1</sup>Former Ph.D. Student, Dept. water structures Tarbiat Modares University, <sup>2</sup>Dept. of Irrigation Engineering, Tarbiat Modarres University, <sup>3</sup> Dept. of Irrigation Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

---

---

### **Abstract**

A detailed description of the behavior of cohesive fine-grained sediments is a very complicated task. Simulation of cohesive sediment movement has been successfully treated in the past using the macroscopic properties of the water-sediment system. In this study, a 1-Dimensional equation of cohesive sediment has been proposed for deposition term of mass transfer equation. This equation has been solved by Control Volume method and calibrated with laboratory data. The tests have been done in a flume with 0.3m diameter, the slope 0.00008, discharge between 6~12 liter per second and the concentration of 4~7 gram per liter. The model shows that the deposition is a function of flow concentration, flow depth and rate of bottom shear stress to threshold shear stress of deposition.

**Keywords:** Cohesive Sediment; Deposition; Convection Diffusion Equation

