



دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد شانزدهم، شماره سوم، ۱۳۸۸

www.gau.ac.ir/journals

مدل‌سازی عددی رسوبات چسبنده با تعیین ترم‌های نرخ رسوب‌گذاری و ضریب پخشیدگی

مهدی مفتاح هلقی*

استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۸۵/۸/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۶/۲

چکیده

بررسی و تحلیل رفتار جزئی رسوبات ریز دانه چسبنده بسیار پیچیده می‌باشد. زیرا رسوبات ریز دانه چسبنده تحت یک سیکل دائمی فرسایش، حرکت انتقالی، انتشار ملکولی و تلاطمی، تفرق، تشکیل خاک‌دانه، تشکیل کلوخچه، رسوب‌گذاری و تراکم هستند. شبیه‌سازی حرکت رسوبات چسبنده به‌طور شدید به خواص ماکروسکوپی از سیستم آب-رسوب وابسته می‌باشد. در این تحقیق یک رابطه برای رسوب‌گذاری رسوبات ریز دانه چسبنده و یک رابطه برای ضریب پخشیدگی در حالت جریان یک بعدی پیشنهاد و در معادله انتقال جرم قرار داده شد. این معادله با روش حجم کنترل حل و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی واسنجی گردیده است. آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به عرض ۳۰ سانتی‌متر، شیب ۰/۰۰۰۰۸، دبی جریان بین ۳ تا ۵/۷ لیتر بر ثانیه و غلظت‌های ۴ الی ۸ گرم بر لیتر انجام شده است. در مدل پیشنهادی مشخص شد که ضریب پخشیدگی رسوبات ریز دانه چسبنده تحت تاثیر پارامترهای عدد رینولدز و نسبت سرعت جریان به سرعت برشی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: رسوبات چسبنده، رسوب‌گذاری، ضریب پخشیدگی، معادله انتقال-انتشار

مقدمه

توصیف تفصیلی رفتار رسوبات چسبنده امر بسیار پیچیده‌ای می‌باشد. زیرا رسوبات ریز دانه چسبنده تحت یک سیکل دائمی فرسایش، حرکت انتقالی، انتشار ملکولی و تلاطمی، تفرق، تشکیل خاک‌دانه،

* مسئول مکاتبه: meftah_20@yahoo.com

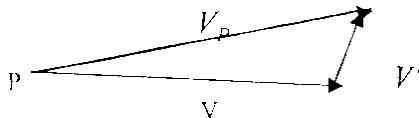
تشکیل کلوخچه، رسوب گذاری و تراکم هستند (اسکارلاتوس، ۱۹۸۱). شبیه سازی هر یک از مراحل سیکل فرسایش و رسوب گذاری به تنهایی پیچیده است. زیرا یک ذره رسوب زمانی ته نشین، زمانی در حرکت، تعلیق و گاهی ممکن است در بستر متراکم شده باشد. از این رو باید در شبیه سازی حرکت رسوبات چسبنده، مسأله را با نگرش سیستمی حل کرده 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 می باشد و یا این که در این مقطع عمل فرسایش اتفاق می افتد یا عمل رسوب گذاری و تغییرات عمق در این حالت چقدر است. برای اولین بار آد و اون (۱۹۷۲) مدل انتقال رسوبات چسبنده را با در نظر گرفتن تمام مراحل رسوب گذاری براساس معادله انتقال جرم، به صورت زیر به کار گرفتند:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + S \quad (1)$$

که در آن C غلظت رسوب، D ضریب انتشار تلاطمی، S نرخ فرسایش یا رسوب گذاری می باشد. مفهوم حرکت انتقالی سیال به سرعت متوسط سیال (حجم سیال عبوری در واحد سطح مقطع عرضی) مربوط می شود و نرخ انتقال جرم ناشی از انتقال به اقتضای سرعت متوسط در راستای محور X از رابطه $u \frac{\partial C}{\partial x}$ به دست می آید. این رابطه در واقع نشان دهنده آن است که غلظت C ، متوسط مقدار غلظت در مقطع عرضی است و بنابراین در مدل کردن پدیده انتقال-انتشار (پخشیدگی) نیازی به اندازه گیری مقادیر نقطه ای سرعت و غلظت نمی باشد، بلکه اندازه گیری یا محاسبه مقادیر متوسط هر یک در مقاطع عرضی کافی است. در جریان های حقیقی نظیر آنچه که در کانال های روباز رخ می دهد، توزیع سرعت یکنواخت نیست و تفاوت در نرخ انتقال جرمی که با سرعت واقعی انتقال می یابد با آنچه که با سرعت متوسط حمل می شود، به طور غیر محسوس به جمله انتشار مربوط می شود. این اختلاف معنی تفرق^۱ را می رساند (دیلی و هارلمان، ۱۹۶۶). به عبارت دیگر، کل انتقال انجام شده ناشی از دو ترم حرکت انتقالی و حرکت انتشاری یا تفرقی می باشد. مطابق شکل شماره ۱ اگر در نقطه ای از سیال به نام P بردار سرعت V_p باشد، این بردار قابل تجزیه به دو مولفه سرعت متوسط مقطع (V) و سرعت نوسانی (V') می باشد. جرمی که به طور واقعی انتقال می یابد، مربوط به سرعت واقعی ذره است. بردار سرعت متوسط جریان نشان دهنده حرکت انتقالی^۲ و سرعت نوسانی مربوط به حرکت

1. Dispersion
2. Advective Transport

انتشاری یا حرکت تفرقی^۱ می‌باشد در واقع مقدار انتقال ناشی از پخشیدگی به جمله $\frac{\partial}{\partial x}(D\frac{\partial C}{\partial x})$ مربوط می‌شود (بنت و ژنگ، ۱۹۹۵).



شکل ۱- مؤلفه‌های بردار سرعت جریان در حرکت‌های انتقالی و پخشیدگی.

در دو دهه اخیر، مطالعات زیادی در مورد کارهای آزمایشگاهی و همچنین روش‌های حل تحلیلی و حل عددی حرکت رسوبات ریز دانه چسبیده انجام شده است. در رابطه رسوبات چسبنده و جریان‌های غلیظ در کشور ایران نیز تحقیقات متعددی انجام شده ولی تاکنون در راستای اهداف این تحقیق، نتایجی ارائه نشده است. در این تحقیق سعی بر آن بوده که با پیشنهاد معادله نرخ رسوب‌گذاری و ضریب پخشیدگی بتوان برآورد دقیق‌تری از میزان انتقال رسوبات چسبنده به‌دست آورد. مهم‌ترین مطالعات به عمل آمده در مورد استفاده از معادلات ارائه شده برای رسوب‌گذاری جهت حل عددی معادله، انتقال جرم و واسنجی مدل برای استفاده در رودخانه مشخصی بوده است. همچنین مدل‌های پیشنهادی در برگیرنده پارامترهای محدودی از مشخصات سیال و یا رسوب بوده‌اند. از مدل‌های ارائه شده برای مثال می‌توان به مدل رینالدو و همکاران (۱۹۹۹) اشاره نمود که در آن نرخ رسوب‌گذاری را تابع سرعت سقوط ذرات و غلظت آن‌ها بیان نموده‌اند. اسکارلاتوس و لای (۱۹۹۷) بر اساس رابطه تعادل جرم در لایه کف، مقدار رسوب‌گذاری را برحسب تغییر عمق لایه بستر بیان نمودند. آن‌ها 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 با الهام از این معادله، رابطه کرون (۱۹۹۹) ارائه شد که رسوب‌گذاری را تابع پارامترهای سرعت سقوط، غلظت رسوب و نسبت تنش برشی بستر به تنش برشی آستانه رسوب‌گذاری تعریف کرده است.

بررسی روابط به‌طورکلی نشان می‌دهد که رسوب‌گذاری زمانی انجام می‌شود که تنش برشی متوسط جریان که به بستر وارد می‌شود، کمتر از تنش برشی آستانه رسوب‌گذاری باشد. مقدار تنش

1. Dispersive Transport

برشی آستانه رسوب‌گذاری در آزمایش‌های محققان به صورت یک عدد مشخص و یا در دامنه‌ای از اعداد تعریف شده است (مفتاح‌هلقی و همکاران، ۲۰۰۵).

از دیگر موارد مهم تحلیل جریان رسوبات چسبنده، تعیین سرعت سقوط و همچنین ضریب پخشیدگی معادله انتقال جرم می‌باشد. تعدادی از محققان مانند کانسیو و نوس (۱۹۹۵)، کانسیو و نوس (۱۹۹۸)، کرون (۱۹۶۲)، مهتا و پارسنید (۱۹۷۳) و مهتا و پارسنید (۱۹۷۹) سرعت سقوط را تابعی از غلظت سیال تعریف نموده‌اند ولی ماولا (۱۹۹۸) با انجام آزمایش‌های متعدد نشان داد که سرعت سقوط ذرات چسبنده به صورت ضریبی از سرعت سقوط دانه‌ای غیرچسبنده که از قانون استوکس حاصل می‌شود قابل تعریف است و به‌طورکلی با ثابت بودن مشخصات سیال، سرعت سقوط ذرات چسبنده تابعی از قطر آن‌ها تعریف می‌شود. در مورد ضریب انتشار یا پخشیدگی مطالعات محدودی انجام شده است. برای مثال ریدار و اولسن (۱۹۹۹) و ریدار و اولسن (۲۰۰۲) ضریب پخشیدگی را تابع عمق جریان و سرعت برشی تعریف نموده‌اند و یا فالکونر و پی‌گورد (۱۹۹۲) این ضریب را تابعی از لزجت 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. هایتر (۱۹۹۵) این ضریب را تابعی از پارامترهای سرعت متوسط جریان، عمق جریان و سرعت برشی تعریف نمود.

مفتاح‌هلقی و همکاران (۲۰۰۵) یک معادله یک بعدی رسوبات چسبنده برای رسوب‌گذاری به‌دست آوردند. در بررسی آنها نرخ انتقال رسوب پیشنهادی در رابطه انتقال-پخشیدگی قرار داده شده و این معادله با روش حجم کنترل حل و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی واسنجی شده است. آزمایش‌های آن‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به عرض ۳۰ سانتی‌متر، دبی جریان بین ۶ تا ۱۲ لیتر بر ثانیه و غلظت‌های ۴ الی ۷ گرم بر لیتر انجام شده است. در مدل پیشنهادی آنها مشخص شد که مقدار رسوب‌گذاری به‌طور شدید تحت تأثیر پارامترهای غلظت جریان، عمق جریان و تنش برشی متوسط جریان و همچنین ضریب پخشیدگی تابعی از سرعت برشی و عدد رینولدز جریان می‌باشد.

صمدی‌بروجنی و همکاران (۲۰۰۸) با انجام آزمایش‌هایی بر روی رسوب‌گذاری رسوبات چسبنده نشان دادند که به دلیل ارتفاع آب بالای رسوبات ته‌نشین شده، دانسیته رسوبات ته‌نشین شده در طول زمان رو به افزایش می‌باشد و این در حالی است که در بیشتر معادلات ارائه شده دانسیته ثابت فرض شده و با فرض تغییرات دانسیته، پخشیدگی رسوبات از بستر به سمت جریان بررسی شده است. همچنین فو و همکاران (۲۰۰۵) مطالعاتی را بر روی ضریب پخشیدگی رسوبات چسبنده انجام دادند.

آنها اظهار داشتند که تفرق رسوبات ریزدانه در جهت عمودی، تابعی از ضریب پخشیدگی جریان می‌باشد. همچنین انتشار تلاطمی ناشی از دو علت است. اول به دلیل انتقال رسوبات از لایه‌ای به لایه دیگر، که خود بستگی به سرعت کلوخچه‌ای شدن رسوبات چسبنده دارد و دیگری ناشی از اندرکنش رسوب و تلاطم جریان می‌باشد. همچنین آنها نشان دادند که در مورد بسترهای چسبنده ضریب پخشیدگی تابعی از عدد اشمیت می‌باشد.

در برنامه‌های نرم‌افزاری موجود که کاربرد بسیار زیادی در محاسبات برآورد رسوب دارند از معادله‌های ارائه شده توسط محققان، استفاده شده است. مثلاً در برنامه نرم‌افزاری HEC-6 جمله رسوب‌گذاری بر مبنای معادلات کرون (۱۹۶۲) و یا آریا سورای و کرون (۱۹۷۶) می‌باشد و یا در برنامه نرم‌افزاری MIKE-11 و MIKE-21 از معادله پیشنهادی اسکارلاتوس و لای (۱۹۹۷) استفاده شده و همچنین در این نرم‌افزار ضریب پخشیدگی تابعی غیرخطی از سرعت در نظر گرفته شده است. با توجه به این که هر یک از محققان تعداد محدودی از پارامترهای مربوط در پدیده رسوب‌گذاری و یا ضریب انتشار را در نظر گرفته و روابط خود را ارائه نموده‌اند، از این رو در این بررسی جملات ضریب پخشیدگی و معادله نرخ رسوب‌گذاری به صورت توابعی که از آنالیز ابعادی نتیجه شده‌اند، در معادله انتقال-انتشار قرار داده شده و حتی المقدور سعی گردیده 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 با پیشنهاد یک جمله به عنوان معادله فرسایش در جمله منبع این معادله، مدل ریاضی حل شده و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، ضرائب بهینه معادله پیشنهادی با اعمال بهینه‌سازی ریاضی و اسنچی شده است.

مواد و روش‌ها

بر اساس مطالعات و نتایج آزمایشگاهی سایر محققان 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 می‌باشد، تابعی است از پارامترهای سرعت جریان (V)، عمق جریان (h)، سرعت برشی جریان (u^*)، دانسیته سیال (ρ) و ویسکوزیته سیال (μ).

- جمله رسوب‌گذاری (D_e) تابعی است از پارامترهای دانسیته سیال (ρ)، دانسیته ذرات رسوبی (ρ_s)، قطر ذرات رسوب (D_s)، زمان (t)، لزوجت سیال (μ)، سرعت جریان (V)، غلظت رسوب (C)، شیب کف آبراهه (S)، عمق جریان (h)، شتاب ثقل (g) و تنش برشی آستانه رسوب‌گذاری (τ_d).

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

$$D = A_1 (V \cdot h) \left(\frac{U_*}{V} \right)^{\alpha_1} \left(\frac{\rho \cdot V \cdot h}{\mu} \right)^{\alpha_2} \quad (2)$$

$$D_e = A_3 \left(\frac{\rho \cdot V}{h} \right)^{\alpha_3} \left(\frac{V \cdot t}{h} \right)^{\alpha_4} \left(\frac{\rho \cdot V \cdot h}{\mu} \right)^{\alpha_5} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_d} \right)^{\alpha_6} C^{\alpha_7} \left(\frac{V}{\omega_s} \right)^{\alpha_8} \left(\frac{\rho \cdot S}{\rho} \right)^{\alpha_9} \left(\frac{V^2}{gh} \right)^{\alpha_{10}} \left(\frac{h}{D_s} \right)^{\alpha_{11}} \quad (3)$$

که در آنها جمله $\frac{V \cdot t}{h}$ عدد استروهمال، $\frac{\rho \cdot V \cdot h}{\mu}$ عدد رینولدز جریان، $\frac{V^2}{gh}$ مجذور عدد فرود جریان بوده و ضرایب $A_1, A_2, A_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8, \alpha_9, \alpha_{10}, \alpha_{11}, 0, \dots$ ضرایب مجهولی هستند که در واسنجی مشخص می‌شوند. مقادیر بالا 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 (پاتانکار، ۱۹۶۵). جمله رسوب‌گذاری نیز مشابه رابطه ماولا (۱۹۹۸) به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$\omega_s = A_2 \cdot D_s^{\alpha} \quad (4)$$

با جای‌گذاری رابطه‌های ۲ تا ۴ در معادله ۱ و حل عددی آن، مقادیر غلظت رسوب در هر مقطع زمانی و مکانی محاسبه 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، مقادیر ضخامت لایه بستر ناشی از رسوب‌گذاری در مقاطع موردنظر محاسبه گردیده 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 ضرائب مجهول معادلات از برنامه بهینه‌سازی تبدیل شده پاول (۱۹۶۴) استفاده به عمل آمده است. اساس بهینه‌سازی کمینه کردن تابع زیر بوده است:

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

که در آن N تعداد داده Z_o و Z_e ضخامت بسترهای مشاهده‌ای و محاسبه‌ای می‌باشد. مهم‌ترین مزیت روش پاول، در عدم استفاده از مشتق توابع می‌باشد. تابعی که با n متغیر مستقل در نظر گرفته می‌شود، برای پیدا کردن نقطه کمینه در این روش، روی n امتداد هادی حرکت صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر در یک فضای n بعدی، n امتداد هادی در نظر گرفته و روی آن حرکت کرده تا نقطه کمینه روی یکی از این امتدادها به دست آید و این عمل برای همه امتدادها تکرار می‌شود و حداقل مطلق روی یکی از این امتدادها قرار خواهد گرفت (باکس، ۱۹۶۶).

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 اندکی شود، علاوه بر کمینه نمودن مجموع تفاضل عمق لایه بستر مشاهداتی و محاسباتی، ضرایب همبستگی بین مقادیر نیز کنترل شده است.

در تحقیق حاضر پس از انتخاب گام زمانی ۰/۱ ساعت و گام مکانی یک متر، در زمان کل یک ساعت و طول بازه ۱۰ متر، معادله انتقال جرم به روش ضمنی حل و ضرایب مجهول با روش بهینه‌سازی طبق روش پاول برآورد شده است.

به منظور واسنجی مدل ۱۲ سری آزمایش روی نمونه‌های رسوب انجام شده است این آزمایش‌ها با انتخاب ۲ قطر ۲۱ و ۳۵ میکرون، ۲ دبی جریان ۳ و ۵ لیتر بر ثانیه و ۳ غلظت جریان ۶، ۹ و ۱۲ گرم بر لیتر انجام 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 می‌شدند. عمل اختلاط در مخزن در طول انجام آزمایش‌ها به صورت دائم انجام شده و این 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 به عنوان دبی جریان در نظر گرفته شده و محاسبات بر این مبنا انجام گردیده است. مقادیر عمق فرسایش یافته رسوبات چسبنده در هر آزمایش پس از زمان یک ساعت در فواصل ۲، ۴، ۶ و 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 و حل معادله انتقال جرم و تکرار آن برای هر آزمایش بر اساس

مقادیر ماتریس یاد شده انجام گردیده است. در شکل‌های ۲ و ۳ نمای کانال مورد استفاده و نمونه‌ای از بستر ته‌نشین شده نشان داده شده است.



شکل ۳- نمونه‌ای از بستر ته‌نشین شده.



شکل ۲- نمایی از فلوم آزمایشگاهی.

نتایج و بحث

برای واسنجی مدل، ابتدا داده‌های حاصل از ۶ سری آزمایش (از مجموع ۱۲ سری آزمایش) که در هر آزمایش داده‌های ۴ مقطع جریان اندازه‌گیری شده (جمعاً ۲۴ سری داده)، انتخاب و ضرایب مدل با عمل بهینه‌سازی ریاضی به‌دست آمد. نتیجه حاصله به شرح زیر می‌باشد:

$$S_d = 0.00164 \left(\frac{\rho \cdot v}{h} \right) \cdot \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_d} \right)^{0.145} (C_0)^{1.256} \left(\frac{v}{\omega_s} \right)^{0.045} \quad (7)$$

$$D = 130 (vh) \left(\frac{v}{u_*} \right)^{-0.84} \left(\frac{\rho vh}{\mu} \right)^{0.32} \quad (8)$$

$$\omega_s = 0.0045 D_s^{0.058} \quad (9)$$

از مجموع ۱۲ سری آزمایش انجام شده، نتایج ۶ سری از آزمایش‌ها (با ۲۴ مقطع) به‌منظور واسنجی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج ۶ سری آزمایش دیگر (۲۴ مقطع) به‌منظور صحت‌یابی (اعتبارسنجی) مدل استفاده گردید. دامنه تغییرات پارامترهای به‌کار رفته در جدول ۱ ارائه شده است. در این مرحله با اعمال ضرائب حاصل از بهینه‌سازی در برنامه اصلی، مجموع خطای مدل برای آزمایش‌ها مرحله صحت‌یابی محاسبه گردید. نتایج حاصله به شرح زیر می‌باشند:

در مدل نهایی رسوب‌گذاری خطای مرحله واسنجی بر اساس خطای مجموع قدرمطلق‌ها ۶/۹ میلی‌متر بود که این خطا در مرحله صحت‌یابی (اعتبارسنجی) به مقدار ۱۵/۸ میلی‌متر افزایش یافت یعنی

خطا به میزان ۱/۳ برابر افزایش یافته است. در این حالت خطای نسبی معادل ۱۵/۲ درصد و ضریب همبستگی بین مقادیر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای به صورت $R^2=0/8699$ نتیجه شده است. و در صورت استفاده از خطای مجموع توان‌های دوم و چهارم که در آن‌ها خطای مطلق واسنجی به ترتیب ۲/۰۲ و ۱/۱۸ میلی‌متر بود، خطای اعتبارسنجی به ترتیب ۴/۰۱ و ۴/۴ میلی‌متر نتیجه گردید.

جدول ۱- دامنه تغییرات پارامترهای مدل.

پارامتر	قطر متوسط دانه رسوب (میکرومتر)	دبی جریان (لیتر بر ثانیه)	سرعت برشی (سانتی‌متر بر ثانیه)	عدد فرود جریان	عدد رینولدز جریان	عمق جریان (سانتی‌متر)	غلظت رسوب ورودی در زمان صفر (ppm)
حداقل	۲۱	۳/۱۲	۰/۷۴	۰/۰۶۴	۱۰۴۰۰	۱۳/۱	۵۹۰۰
حداکثر	۳۵	۵/۷۴	۰/۸۲	۰/۰۷۱	۱۹۱۳۳	۲۰/۶	۱۲۱۰۰

به منظور مقایسه نتایج حاصل از مدل نتیجه شده برای نرخ رسوب‌گذاری در این تحقیق با سایر مدل‌ها، تعدادی از مدل‌ها که اولاً کاربرد بیشتری از آن‌ها در تحقیقات محققان به چشم می‌خورد و ثانیاً پارامترهای به کار رفته در آن‌ها در آزمایش‌های این تحقیق اندازه‌گیری شده، انتخاب گردیده است. با قرار دادن داده‌های اندازه‌گیری شده در این تحقیق، در سایر مدل‌ها، نتایج به صورت جدول ۲ مقایسه شده است.

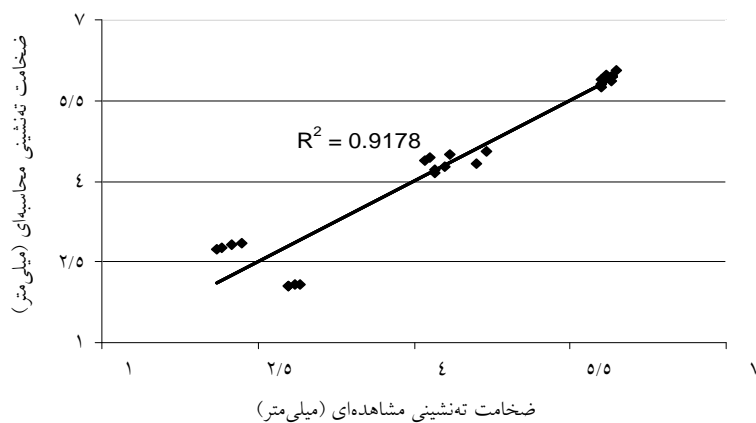
جدول ۲- مقایسه خطای مدل‌های مختلف برای نرخ رسوب‌گذاری بر مبنای داده‌های این تحقیق.

نام رابطه	خطای مطلق (میلی‌متر)	درصد خطای نسبی میانگین	ضریب همبستگی R^2
کرون (۱۹۹۹)	۱۲۱	۱۱۷	۰/۴۰۴
مهتا (۱۹۷۹)	۱۱۶	۱۱۲	۰/۲۶۶
مدل نهایی این تحقیق	۶/۹۱	۶/۷	۰/۹۱۸

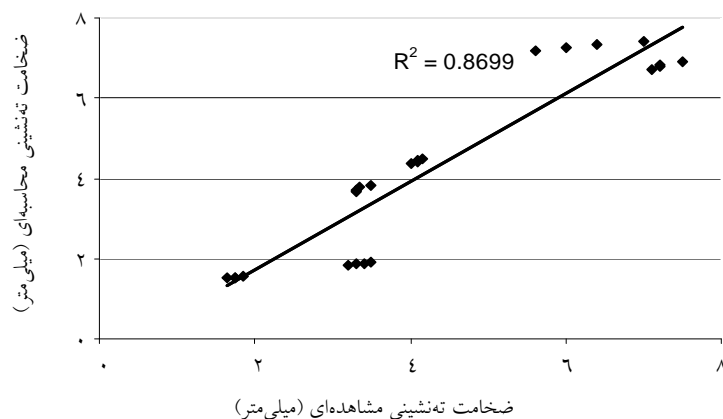
در تحلیل حساسیت ضرایب حاصل از بهینه‌سازی برای نرخ رسوب‌گذاری، مشخص شد که پارامتر غلظت جریان بیشترین حساسیت در مدل را دارد. به طوری که به ازای افزایش ۵۰ درصد توان جمله غلظت در رابطه نهایی، مقدار خطای مدل به ۱۵/۴۶ برابر افزایش می‌یابد و یا به ازای کاهش ۲۰

درصد، مقدار خطا $39/84$ برابر افزایش می‌یابد. همچنین برای مثال با افزایش ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ درصد توان جمله $\frac{V}{\omega_s}$ در معادله نرخ رسوب گذاری، مقادیر خطا به ترتیب به میزان $5/16$ ، $9/13$ ، $5/32$ و $5/99$ درصد افزایش می‌یابد.

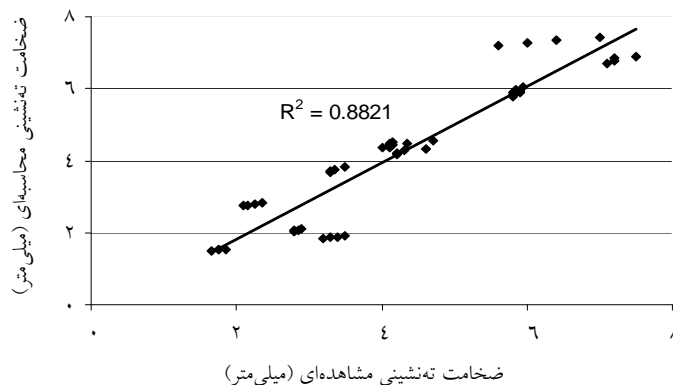
رابطه بین عمق‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است. به طوری که ملاحظه می‌گردد، مدل به دست آمده ضمن دربرگرفتن پارامترهای زیادی از خصوصیات رسوب و جریان، از خطای کمتری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار بود.



شکل ۴- رابطه بین عمق‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای در مرحله واسنجی مدل رسوب گذاری.

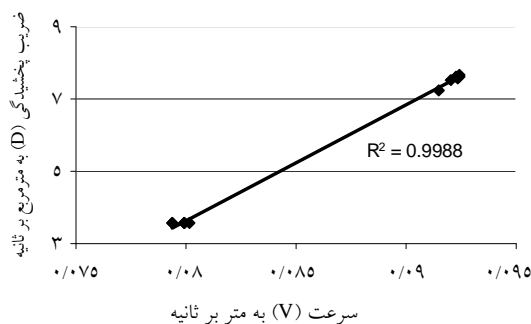


شکل ۵- رابطه بین عمق‌های محاسبه‌ای در مرحله واسنجی و مشاهده‌ای در مرحله اعتبارسنجی مدل رسوب گذاری.

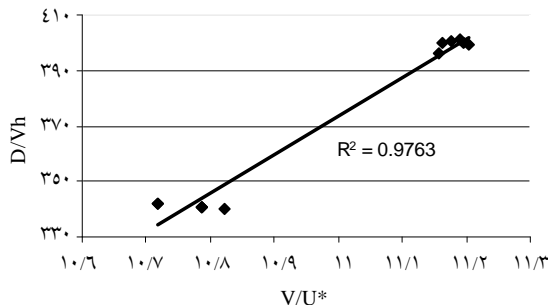


شکل ۶- رابطه بین عمق‌های محاسباتی و مشاهداتی در مرحله واسنجی مدل رسوب‌گذاری (تمام داده‌ها).

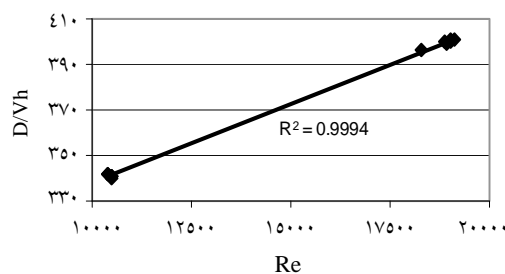
پس از مقایسه نتایج مدل عددی برای روابط به‌دست آمده از نرخ رسوب‌گذاری، نتایج به‌دست آمده برای ضریب پخشیدگی نیز مورد بررسی و مقایسه با سایر مدل‌ها قرار گرفت. برای این منظور ابتدا رابطه تغییرات ضریب پخشیدگی با سرعت جریان در شکل ۷ ترسیم گردید. بررسی رابطه به‌دست آمده رابطه خطی بسیار خوبی را بین این دو پارامتر نشان می‌دهد. همچنین بر اساس رابطه شماره ۲ پارامترهای بی‌بعد V/U_* و D/Vh در مقایسه با هم در شکل ۸ و روند تغییرات پارامترهای بی‌بعد رینولدز و D/Vh در شکل ۹ ترسیم گردید که این دو شکل همبستگی بسیار خوب بین پارامترهای مورد مقایسه را نشان می‌دهد. بنابر این فرض وابسته بودن ضریب پخشیدگی به پارامترهای سرعت جریان، سرعت برشی و عدد رینولدز از اطمینان بالایی برخوردار است. مورد یاد شده در مطالعات مفتاح‌هلقی و همکاران (۲۰۰۵) نیز مشاهده شده است ایشان رابطه ضریب پخشیدگی با سرعت متوسط جریان را بر اساس شکل ۱۰ نتیجه گرفتند. که با نتایج این تحقیق هماهنگی بسیار خوبی را نشان می‌دهد.



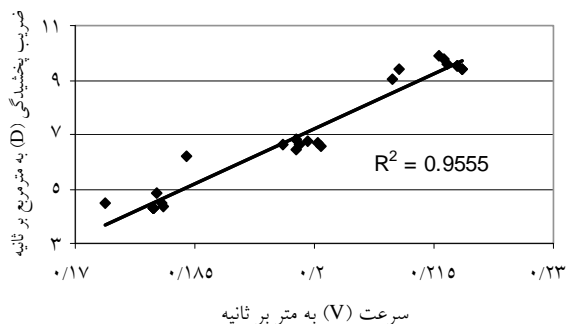
شکل ۷- رابطه تغییرات ضریب پخشیدگی با سرعت متوسط جریان.



شکل ۸- رابطه تغییرات پارامترهای بی بعد V/U^* و D/V_h .



شکل ۹- رابطه تغییرات پارامتر بی بعد D/V_h و عدد رینولدز.



شکل ۱۰- رابطه تغییرات ضریب پخشیدگی و سرعت متوسط جریان (مفتاح و همکاران، ۲۰۰۵).

از آنجا که اشاره شد در بسته نرم افزار MIKE-21 ضریب پخشیدگی تابعی غیرخطی از سرعت متوسط جریان فرض شده و این نرم افزار کاربرد وسیعی در برآورد نرخ انتقال رسوب دارد، بنابراین نتایج این تحقیق، مشابه نتایج مفتاح هلقی و همکاران (۲۰۰۵) بیانگر رابطه مستقیم ضریب پخشیدگی رسوبات ریز دانه چسبنده با سرعت متوسط جریان می باشد.

در نتیجه‌گیری نهایی می‌توان گفت که نتایج حاصل از این تحقیق، ضمن برخورداری از خطای کمتر نسبت به تعدادی از مدل‌های منتخب در تعیین نرخ رسوب‌گذاری، هماهنگی خوبی را با نرم‌افزار MIKE-21 در برآورد ضریب پخشیدگی نشان می‌دهد. با توجه به به‌کارگیری پارامترهای بیشتر از جریان در معادلات پیشنهادی این تحقیق، می‌توان گفت نتایج حاصله می‌تواند از دقت بیشتری برخوردار باشد.

منابع

1. Ariathurai, R., and Krone, R.B. 1976. Finite element model for cohesive sediment transport. *J. of hydraulic Div., ASCE* 102, Pp: 323-338.
2. Bennett, G.D., and Zheng, C. 1995. Applied contaminant transport modeling. first Edition, Van Nostrand Reinhold, 324p.
3. Box, M.J. 1966. A comparison of several current optimization methods and use of transformation in constrained problem. *Computer j.*, 9:9. 53-64.
4. Cancio, L., and Neves, R. 1995. Three dimensional model system for Baroclinic estuarine dynamics and suspended sediment transport in a mesotidal estuary. *Computational mechanics publications*, Pp: 353-360.
5. Cancio, L., and Neves, R. 1999. Hydrodynamics and sediment suspension modelling in stuarine system. *J. of marine systems*. No. 22:105-116.
6. Daily, W.D., and Harleman, R.F. 1966, "Fluid Dynamics.", Addison-Wesley, London.
7. Falconer, E.J., and Peigoard, R. 1992, Mechanics of coastal sediment transport Advanced series on ocean Eng. Worldscientific, New Jersey, 3:57-66.
8. Fu, X., Wang, G., and Shao, X. 2005. Vertical Dispersion of Fine and Coarse Sediments in Turbulent Open-Channel Flows. *J. of hydraulic Eng. ASCE*.
9. 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, Pp: 21-87.
10. Krone, R.B. 1962. Flume studies of the transport of sediment in estuaries shoarline processes. Final report, Hydraulic Eng. lab. and Sanitary Eng. Research lab., Univ. of California, Berkely, June. 291p.
11. Krone, R.B. 1999. Effects of bed structure on erosion of cohesive sediment. *J. of Hydraulic Eng. ASCE*. 12: 1297-1301.
12. Mawla, A.S. 1998. Deposition and bed density development of cohesive sediment under waves. Ph.D. thesis, Civil Eng. Dep., Faculty of Eng., Suez Canal University. 211p.

13. Meftah Halaghi, M., Mohammad Vali Samani, J., and Mohammad Vali Samani H. 2005. 1-D model of cohesive sediment transport in open channel flow. J. of Goran agricultural university and natural resources. 1:105-114.
14. Mehta, A.J., and Partheniades, E. 1973. Depositional behaviour of cohesive sediments. Coastal and Oceanographic Eng. Lab. Repors No.16., Univ. of Florida. 97p.
15. Mehta, A.J., and Partheniades, E. 1979. Kaolinite resuspension properties. Tech. Note. Proc ASCE, 105:164-177.
16. MIKE-11 User Manual. 1997. Cohesive sediment transport module. DHI Water and Environment. 164p.
17. Odd, N.V.M., and Owen, M.W. 1972. A two-layer model of mud transport in the Thames estuary. In-Proceeding, Ins. Of Civil Eng. London, Pp: 195-202.
18. Patankar, S.V. 1965. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere. pub. London, Pp: 79-135.
19. Powell, M.J.D. 1964. An efficient method for finding the minimum of function of several variables without calculating derivatives. Computer J., 4:7. 303-307.
20. Reidar, N., and Olsen, B. 1999. Computational fluid dynamics in hydraulic and sedimentation Eng. Dep. of Hydraulic and Environmental Eng. University Press, Pp: 3-17.
21. Reidar, N., and Olsen, B. 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, Pp: 5-17.
22. Reinaldo, G.M., Saavedra, I., and Villoria, C. 1999. A two dimensional computational model to simulate suspended sediment transport and bed changes. J. of hydraulic research, 37:327-344.
23. Samadi Boroujeni, H., Fathi Moghaddam, M., Shafaie Bajestan, M., and Mohammad Vali Samani, H. 2008. Modelling of sedimentation and self-weight consolidation of cohesive sediments, Proceedings in Marine Science, 9:165-191.
24. Scarlates, P.D. 1981. On the numerical modeling of cohesive sediment transport. J. of Hydraulic research, 19:1. 61-68.
25. Scarlatos, P.D., and Li, L. 1997. Analysis of fine-grained sediment movement in small canals. J. of hydraulic Eng., 112:3. 199-211.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 16(3), 2009
www.gau.ac.ir/journals

Numerical modelling to define deposition rate and dispersion coefficient of cohesive sediments

***M. Meftah Halaghi**

Assistant Prof. Dept. Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

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 and dispersion coefficient 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 3~5.7 liter per second and the concentration of 4~8 gram per liter. The model shows that the dispersion coefficient is a function of Reynolds number and rate of velocity to shear velocity.

Keywords: Cohesive sediment, Dispersion coefficient, Mass transfer equation

* Corresponding Author; Email: meftah_20@yahoo.com

