

توسعه مدل شبیه‌سازی تغییرات بستر رودخانه‌های شنی تحت جریان ناپایدار با رسوب ورودی از بالادست

مهدی باقری‌نژاد^۱، محمدرضا مجدزاده طباطبایی^{۲*}، سید سعید موسوی ندوشنی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- رودخانه، دانشگاه صنعت آب برق (شهید عباسپور)

۲ و ۳- استادیار دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

* تهران، کد پستی ۱۷۱۹-۱۶۷۶۵

mrmtatabai@yahoo.com

چکیده- به دست آوردن جواب‌های تحلیلی معادلات تغییر تراز بستر، کاری بسیار دشوار و اغلب ناممکن است. با فرض جریان شبه پایدار و با ساده‌سازی‌هایی، حل تحلیلی این معادلات ممکن خواهد بود. در این تحقیق حل معادلات حاکم، متغیرهای مجهول شامل پارامترهای هیدرلیکی جریان، توزیع دانه‌بندی، شیب، تراز سطح و بار بستر رودخانه در هر زمان (از لحظه شروع سیلاب) به دست می‌آید. پس از صحت‌سنجی و تحلیل حساسیت مدل با داده‌های آزمایشگاهی، تأثیر شکل هیدروگراف (مقارن و نامقارن) بر تغییرات بستر رودخانه مطالعه شده است. هدف اصلی این مقاله، توسعه مدلی تحلیلی برای مطالعه تغییرات بستر رودخانه در هنگام وقوع سیلاب و با در نظر گرفتن رسوب ورودی از بالادست است. در این مدل، غیریکنواختی نیز با استفاده از تابع پنهان‌شدگی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که تابع پنهان‌شدگی ذرات به طور مناسبی، غیریکنواختی ذرات را مدل‌سازی کرده است. نتایج مدل برای مقادیر عدد فرود جریان کوچکتر از ۰/۸ به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک است.

کلیدواژگان: مسلح شدن، تابع پنهان‌شدگی، مدل تحلیلی، ترازکاهی، هیدروگراف.

۱- مقدمه

روی بستر باقی می‌مانند. با ادامه این پدیده، لایه‌ای بر روی بستر ایجاد می‌شود که از ادامه فرایند فرسایش جلوگیری می‌کند. این لایه درشت‌دانه به وجود آمده بر روی بستر را لایه مسلح^۱ می‌نامند (Parker, 2006).

امروزه مدل‌های عددی کاربردهای گسترده‌ای در بررسی فرایند مسلح شدن بستر دارند، اما کاربرد این مدل‌ها به دلیل پیچیدگی محاسباتی و در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی متعدد، تا اندازه‌ای سخت و زمان‌بر

یکی از مسائلی که همواره در مهندسی رودخانه مورد توجه محققان بوده، بررسی روند انتقال رسوب در رودخانه و دانه بندی مواد بستر است. با توجه به این که اندازه ذرات بستر در رودخانه‌ها غیریکنواخت است و تغییرات جریان نیز موجب ایجاد مقادیر متفاوت تنش برشی در ذرات می‌شود، فرایند فرسایش ذرات، در فرایند تراز کاهی، به صورت گزینشی انجام می‌شود، به طوری که مصالح ریزدانه‌تر شسته شده و مصالح درشت‌دانه‌تر

1. Armour Layer

آزمایشگاهی نشان دادند که مدل سهموی تطابق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. Gill (1987) تغییرات تراز بستر را به صورت تحلیلی حل کرد. وی حل تحلیلی خود را با داده‌های آزمایشگاهی Soni et al (1980) تطبیق کرد. در این پژوهش، ابتدا معادلات حاکم بر پدیده مسلح شدن تشریح شده و سپس با حل این معادلات، مدلی تحلیلی برای بررسی مسلح شدن بستر و تغییرات ایجاد شده در بستر در حین وقوع سیلاب توسعه داده شده است. با حل هم‌زمان معادلات حاکم، متغیرهای مورد نظر در زمان و مکان‌های مختلف به دست می‌آید.

۲- معادلات حاکم بر پدیده مسلح شدن بستر

معادلات حاکم بر پدیده مسلح شدن عبارت است از معادله پیوستگی جریان، پیوستگی رسوب، مقاومت جریان و انتقال رسوب. با حل هم‌زمان این معادلات، متغیرهای مورد نظر در زمانها و مکان‌های مختلف به دست می‌آید. با توجه به اینکه این مدل توانایی حل جریان ناپایدار را دارد، نخست، با فرض شبه‌دائمی بودن جریان، هیدروگراف سیلاب به شکل پلکانی تبدیل شده و سپس پارامترهای هیدرولیکی جریان شامل سرعت، عمق جریان و تنش برشی برای دبی‌های مختلف به دست می‌آید؛ سپس تغییرات تراز بستر، دانه‌بندی، شیب و بار بستر در هر گام زمانی و مکانی به دست می‌آیند. فرضهای این مدل طوری در نظر گرفته شده تا قابلیت حل تحلیلی داشته باشند. در این مدل، منحنی دانه‌بندی بستر به تعدادی کلاس ذرات تقسیم شده و غیریکنواختی ذرات با استفاده از تابع پنهان‌شدگی ذرات در مدل در نظر گرفته شده است.

۲-۱- معادله پیوستگی جریان

برای مدل‌سازی هیدروگراف سیل در رودخانه‌ها، هیدروگراف به شکل پلکانی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین برای هر گام زمانی معادله پیوستگی را می‌توان به شکل زیر نوشت:

است. این مدل‌ها نقاط ضعف دیگری نیز دارند، مانند وجود خطاهای منفصل‌سازی و عددی در آنها. به دست آوردن جواب‌های تحلیلی برای معادلات سنت-ونانت-اگزرنر که به طور معمول غیرخطی هستند، بسیار دشوار است. اما با فرض جریان شبه پایدار، حل آنها با ساده‌سازی‌هایی امکان‌پذیر می‌شود. Graf (1998) با استفاده از نظریه پایداری جریان، نتیجه‌گیری کرده است که در بازه‌های زمانی کوتاه، جریان را می‌توان پایدار فرض کرد.

Sieben (1998) مدلی تحلیلی را برای مسلح شدن بستر ارائه داد. این مدل برای جریان دائمی و بدون رسوب ورودی از بالادست معتبر است. نکته قابل توجه در مدل تحلیلی Sieben (1998) آن است که وی در مدل خود فرض کرده که در هنگام تغییرات تراز بستر رودخانه، تراز سطح آب ثابت باقی می‌ماند و با توجه به اینکه دبی آب ثابت است، این فرض منطقی به نظر نمی‌رسد.

Tinny (1955) معادله دیفرانسیل یک‌بعدی برای شبیه‌سازی ترازگاهی بستر با رسوبهای یکنواخت را به صورت تحلیلی حل نموده و مدل خود را با نتایج Newton (1951) مقایسه کرد.

Al-Khalif (1965) مدلی تحلیلی ارائه کرده که ترازافزایی بستر را با استفاده از معادله بار بستر Einstein (1950) محاسبه می‌کند. Adachi and Nakato (1969) با فرض شبه‌پایدار بودن جریان، مدلی سهموی را برای تعیین تغییرات تراز بستر ارائه و مدل خود را با استفاده از داده‌های صحرائی نیز تطبیق کردند. Soni et al. (1981) با استفاده از فرضیه‌ای ساده‌کننده، یک حل تحلیلی را برای بار بستر در فرایند ترازافزایی بستر رودخانه‌ها ارائه کرد.

Ribberink and Sande (1985) با فرض شبه‌پایدار بودن جریان، مدلی یک‌بعدی را برای ترازافزایی بستر رودخانه‌ها ارائه کردند. آنان با حل تحلیلی مدل موج ساده، سهموی و هذلولوی و مقایسه مدل با داده‌های

برای اندازه‌های مختلف ذرات (n گروه) نیز نوشت
(Parker, 2006):

$$(1-\lambda_0)[p_i \frac{\partial(z-L_a)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(f_i L_a)] = -\frac{\partial q_{bi}}{\partial x} \quad (4)$$

که در آن p_i کسر مربوط به گروه i -ام با میانگین قطر D_i از رسوبهای موجود در مواد اولیه بستر، f_i کسر مربوط به گروه i -ام با میانگین قطر D_i از رسوبات در لایه فعال بستر، q_{bi} بار بستر در واحد عرض برای گروه i -ام با میانگین قطر D_i و L_a ضخامت لایه فعال است. به کار بردن معادله پیوستگی رسوب برای گروه‌های مختلف ذرات این مزیت را دارد که دانه‌بندی ذرات بستر را نیز به محاسبات وارد می‌کند و با استفاده از آن می‌توان دانه‌بندی بستر را در هر زمان از شروع محاسبات به دست آورد.

۳-۲- معادلات باربستر

در این تحقیق از میان رابطه‌های تجربی انتقال رسوب بستر، از معادلات Meyer-Peter and Müller (1948) و Duboys (1879) استفاده شده است. با توجه به اینکه این معادلات برای موادی با دانه‌بندی یکنواخت معتبر است، از مفهوم تابع پنهان‌شدگی برای بیان اثر غیریکنواختی ذرات استفاده شده است. سه ویژگی در انتخاب رابطه‌های انتقال بار بستر از میان رابطه‌های متعدد بار بستر، در نظر گرفته شده است. اول اینکه دارای آستانه حرکت باشد. دوم این‌که روش به دست آوردن سه معادله متفاوت باشد. برای مثال، معادله Meyer-Peter and Müller (1948) مبتنی بر شیب انرژی جریان، معادله Duboys (1879) مبتنی بر تنش برشی بحرانی و معادله Schoklitsch (1943) مبتنی بر دبی بحرانی جریان است. سوم این‌که معادلات تابع پنهان‌شدگی را بتوان برای آنها به کار برد.

Wong and Parker (2006) رابطه Meyer-Peter and Müller (1948) را برای گروه ذرات به صورت زیر ارائه کردند:

$$q_b = 3.97 f_i(t) \sqrt{g(G_s - 1) d_i^3} [\tau_{*i} - 0.0495]^{3/2} \quad (5)$$

$$Q = \text{constant} \quad \text{یا} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

که در آن Q دبی جریان است.

۲-۲- معادله پیوستگی رسوب

معادله پیوستگی رسوب را مانند معادله پیوستگی جریان می‌توان به دست آورد. تفاوت در نرخ انتقال رسوب ورودی و نرخ رسوب خروجی از هر حجم کنترل، سبب رسوب‌گذاری یا فرسایش بستر می‌شود. Parker et al (2007) برای توصیف معادله پیوستگی رسوب، بستر را به دو قسمت تقسیم کردند که عبارتند از: لایه فعال بالایی (لایه سطحی یا لایه تبدلی) و لایه زیرسطحی. لایه فعال شامل ذراتی است که به صورت مستقیم با بار بستر در تبادل است.

Krishnappan (1985) شکل کلی معادله پیوستگی رسوب برای رودخانه‌ها را در حالت یک‌بعدی به صورت زیر ارائه کرده است:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + (1-\lambda_0)B \frac{\partial z}{\partial t} + BC_s \frac{\partial h}{\partial t} + A \frac{\partial C_s}{\partial t} - BL_a \frac{\partial \lambda}{\partial t} - \frac{B(\lambda-\lambda_0)}{(1-\lambda_0)} \frac{\partial L_a}{\partial t} = q_{sl} \quad (2)$$

که در آن Q_s نرخ انتقال بار رسوبی (بار بستر و معلق)، x فاصله در جهت جریان، λ تخلخل بستر، λ_0 تخلخل اولیه بستر، B عرض جریان، z تراز سطح بستر، C_s غلظت مواد معلق موجود در آب، h عمق جریان، A سطح مقطع جریان، L_a ضخامت لایه فعال، q_{sl} دبی رسوب ورودی از شاخه‌های جانبی یا برداشت رسوب به ازای واحد طول مجرا و t زمان است. با توجه به فرض پلکانی بودن هیدروگراف و با فرض این که تخلخل بستر در مدت فرایند مسلح شدن ثابت باشد، معادله (۲) برای واحد عرض رودخانه به شکل زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{1}{(1-\lambda_0)} \frac{\partial q_b}{\partial x} \quad (3)$$

که در آن q_b باربستر در واحد عرض است. معادله پیوستگی رسوب را در حالت یک‌بعدی می‌توان

$$\tau = \gamma RS \quad (11)$$

Schoklitsch (1943) استفاده از دبی جریان را در تعیین بار بستر مطرح کرد. معادله بار بستر (Schoklitsch (1943) در سیستم متریک به صورت زیر است (Yang, 1996):

$$q_b = 2500S^{3/2}(q - q_{cr}) \quad (12)$$

$$q_{cr} = \frac{0.6d_m^{3/2}}{S^{7/6}} \quad (13)$$

که در آن q دبی جریان در واحد عرض و q_{cr} دبی بحرانی جریان در آستانه حرکت در واحد عرض است. برای معادله بار بستر (Schoklitsch (1943) نیز چنانچه اثر غیریکنواختی ذرات با استفاده از تابع پنهان‌شدگی ذرات در نظر شود، معادلات (11) و (12) برای هر گروه ذره به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$q_{bi} = 2500f_i S^{3/2} \left(q - \left(\frac{d_i}{d_m} \right)^r q_{cri} \right) \quad (14)$$

$$q_{cri} = \frac{0.6d_i^{3/2}}{S^{7/6}} \quad (15)$$

۴-۲- معادله اندازه حرکت

بر اساس معادله اندازه حرکت، نرخ تغییرات مومنت برابر است با برابری نیروی اعمال شده بر حجم کنترل. رابطه کلی معادله اندازه حرکت برای جریان‌های غیردائمی در کانال‌های روباز به شکل رابطه (۱۶) است.

معادله پیوستگی همراه با معادله اندازه حرکت، معادلات سنت-ونانت را تشکیل می‌دهند. برخلاف ساده‌سازی‌های انجام شده برای به دست آوردن معادلات سنت-ونانت، جواب‌های آنها اغلب پیچیده است (Graf, 1998).

$$\frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - S_0 = -S_f$$

که در آن G_s چگالی نسبی ذرات رسوب، τ^* تنش برشی بی‌بعد ذرات بستر است که از رابطه (۶) به دست می‌آید.

$$\tau_{*i} = \frac{RS}{(G_s - 1)d_i} \quad (6)$$

چنانچه در معادله (۵) از تابع پنهان‌شدگی استفاده شود، این معادله به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$q_b = Kf_i(t) \sqrt{g(G_s - 1)d_i^3} [\tau_{*i} - \varepsilon_i \tau_{*cr}]^{3/2} \quad (7)$$

در معادله (۷) K ضریبی است که با صحت‌سنجی تعیین می‌شود و ε_i تابع پنهان‌شدگی ذرات است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon_i = \left(\frac{d_i}{d_{50}} \right)^r \quad (8)$$

در این معادله r ضریب تابع پنهان‌شدگی ذرات است. شایسته است گفته شود که (Sieben (1998) نیز در مدل خود از این رابطه استفاده کرده است، با این تفاوت که وی از تابع پنهان‌شدگی با شکل توانی استفاده کرده، اما در تحقیق حاضر علاوه بر این از دیگر توابع پنهان‌شدگی نیز استفاده شده است.

فرمول بار بستر ارائه شده توسط Duboys (1879) در سیستم متریک به صورت زیر است (Yang, 1996):

$$q_b = \frac{0.173}{d^{3/4}} \tau (\tau - \tau_{cr}) \quad (9)$$

رابطه (۹) با در نظر گرفتن تابع پنهان‌شدگی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$q_b = \frac{0.173}{d^{3/4}} \tau (\tau - \varepsilon_{ri} \tau_{cr}) \quad (10)$$

در این معادله تنش برشی بحرانی با استفاده از نمودار شیلدز و مقادیر تنش برشی بستر از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$(16) \quad \begin{array}{l} \text{جریان یکنواخت دائمی} \\ \text{جریان غیریکنواخت دائمی} \\ \text{جریان غیریکنواخت غیردائمی} \end{array}$$

۳- توسعه مدل

در این بخش با استفاده از معادلات حاکم، مدلی تحلیلی برای حل این معادلات و محاسبه تغییرات دانه‌بندی بستر، ترازبستر، شیب و بار بستر در زمان و مکان دلخواه از بازه رودخانه ارائه می‌شود.

۳-۱- فرضهای حاکم بر مدل

۱- در این مدل یک‌بعدی، فرض شده که تمامی پارامترها در جهت طولی جریان بررسی می‌شود و از تغییرات در مقطع عرضی رودخانه صرف‌نظر شده است.

۲- هیدروگراف به صورت پلکانی (شبه‌دائمی) در نظر گرفته می‌شود.

۳- در این مدل فرض شده که یک منبع تغذیه رسوب در ابتدای بازه بالادست وجود دارد و رسوب با دبی ثابت وارد بازه مورد مطالعه می‌شود.

۴- از توابع پنهان‌شدگی برای توصیف غیریکنواختی بستر جریان استفاده شده است.

۵- مدل تک‌لایه‌ای است. این بدان مفهوم است که فرض شده تبادل بین رسوبهای بستر رودخانه و جریان، فقط در لایه سطحی صورت می‌گیرد و لایه‌های زیرین دخالتی در تغییرات ترکیب بستر ندارند و دانه‌بندی لایه‌های زیرین دست‌نخورده باقی می‌ماند.

۶- ضخامت لایه فعال در مدت فرایند مسلح شدن ثابت باقی می‌ماند (Ashida and Parker, 2006, 1971).
Parker and Michiue, 1975 و Bayazit, 1975 و Sutherland, 1970).

۷- تمامی رسوبهایی که از بستر برداشت می‌شوند، به‌صورت بار بستر به جریان وارد و به‌صورت بار بستر منتقل می‌شوند.

۸- برای بررسی تغییر ترکیب و توزیع دانه‌بندی ذرات رسوبی، منحنی دانه‌بندی ذرات بستر به تعدادی گروه ذرات تقسیم شده است. که هر گروه ذره i قطری در فاصله d_{i-1} و d_{i+1} دارد. برای محاسبه قطر هر گروه از

ذرات، d_i به‌عنوان نماینده گروه، برابر با

$$\frac{d_{i-1} + d_{i+1}}{2} \text{ در نظر گرفته شده است.}$$

۹- تغییرات تراز بستر، حول نقطه‌ای در پایین‌دست بازه رخ می‌دهد.

۳-۲- حل تحلیلی

با فرض ثابت بودن دبی جریان در هر گام زمانی، معادله پیوستگی جریان را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$h \frac{\partial(U)}{\partial x} + U \frac{\partial(h)}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (17)$$

با ترکیب معادلات (۱۶) و (۱۷)، معادله‌ای به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{\partial(U)}{\partial t} + U \frac{\partial(U)}{\partial x} + \frac{g}{U} \left[-\frac{\partial h}{\partial t} - h \frac{\partial U}{\partial x} \right] + g \frac{\partial z}{\partial x} + g S_f = 0 \quad (18)$$

در معادله (۱۸) مقادیر $\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right)$ و $\left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)$ نسبت به دیگر عبارات بسیار کوچک بوده و می‌توان از این دو جمله صرف‌نظر کرد (Jaramillo and Jain, 1984; Graf, 1998; Garde, 2006). (de Vries (1965). نیز اظهار داشته است که اگر عدد فرود کوچکتر از یک باشد، سرعت آشفتگی بستر به‌طور قابل ملاحظه‌ای کوچکتر از سرعت آشفتگی سطح آب است. این بدان مفهوم است که از عبارات‌های $\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right)$ و $\left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)$ در مقایسه با بقیه پارامترهای معادله (۱۸) می‌توان صرف‌نظر کرد. البته باتوجه به فرض شبه-دائمی بودن جریان نیز می‌توان از $\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right)$ و $\left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)$ صرف‌نظر کرد.

همچنین با فرض شبه‌یکنواخت بودن جریان، معادله (۱۸) به شکل زیر ساده می‌شود:

$$g \frac{\partial z}{\partial x} + g S_f = 0 \quad (19)$$

با استفاده از رابطه سزی و این که $q=Uh$ داریم:

$$g \frac{\partial z}{\partial x} = -g \frac{U^3}{C^2 q} \quad (20)$$

اکثر جواب‌های تحلیلی که توسط محققان به‌دست آمده برای شرایطی است که رسوب ورودی از بالادست صفر باشد. همچنین تمامی جواب‌های تحلیلی بدون در نظر گرفتن غیر یکنواختی ذرات به‌دست آمده‌اند. در این تحقیق معادله (۲۵) برای بستر با دانه‌بندی غیریکنواخت و با فرض وجود رسوب ورودی از بالادست بازه به صورت تحلیلی حل شده است.

برای توصیف ضریب انتشار $K(t)$ رابطه (۲۶) را می‌توان به صورت زیر نوشت (de Vries, 1973):

$$K(t) = \frac{1}{(1-\lambda_0)} \frac{\partial q_b}{\partial U} \left(\frac{U}{3S_0} \right) \left(\frac{U_0}{U} \right)^2 \quad (27)$$

که در آن شاخص 0 شرایط یکنواخت (اولیه) را نشان می‌دهد. اگر $U=U_0$ ، خواهیم داشت (Garde, 2006):

$$K(t) = K_0 = \frac{1}{(1-\lambda_0)} \frac{\partial q_b}{\partial U} \left(\frac{U_0}{3S_0} \right) \quad (28)$$

با استفاده از شکل توانی رابطه انتقال رسوب ذرات بستر یعنی $q_b = aU^b$ را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$K(t) = \frac{1}{(1-\lambda_0)} b q_b \left(\frac{1}{3S_0} \right) \quad (29)$$

در حل معادله (۲۴)، دو حالت ممکن است رخ دهد. حالت اول این است که بازه رودخانه دچار ترازگاهی شود (شکل ۱). حالت دوم این که رسوبها در بازه مورد مطالعه ترسیب شده و پدیده تراز افزایشی بستر رخ دهد (شکل ۲). برای شرایط ترازگاهی بستر، شرایط مرزی و اولیه با توجه شکل ۱ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$z(x,0)=0 \quad \text{شرایط اولیه:}$$

$$z(0,t)=-\Delta h \quad \text{و} \quad \lim_{x \rightarrow \infty} z(x,t) = 0 \quad \text{شرایط مرزی:}$$

جواب معادله (۲۴) با به کارگیری تبدیل لاپلاس، به صورت زیر است:

$$z(x,t) = -\Delta h \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{K(t)t}} \right) \quad (30)$$

که در آن $\operatorname{erfc}()$ تابع خطای مکمل است.

که در آن C ضریب شزی و $q=Uh$ دبی واحد عرض است. با مشتق‌گیری از معادله (۲۰) نسبت به x داریم:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = -\frac{3U^2}{C^2 q} \frac{\partial U}{\partial x} \quad (21)$$

از سوی دیگر رابطه انتقال رسوب را به صورت توانی نیز می‌توان در نظر گرفت (Graf, 1998; Garde, 2006):

$$q_b = aU^b \quad (22)$$

که در آن a و b مقادیر ثابتی است. با جایگذاری از معادله (۲۱) در معادله (۳) داریم:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{1}{(1-\lambda_b)} \frac{\partial q_b}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial x} \quad (23)$$

با ترکیب معادلات (۲۰) و (۲۳)، معادله زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial z}{\partial t} - \frac{1}{(1-\lambda_b)} \frac{\partial q_b}{\partial U} \left(\frac{Cq^2}{3U^2} \right) \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0 \quad (24)$$

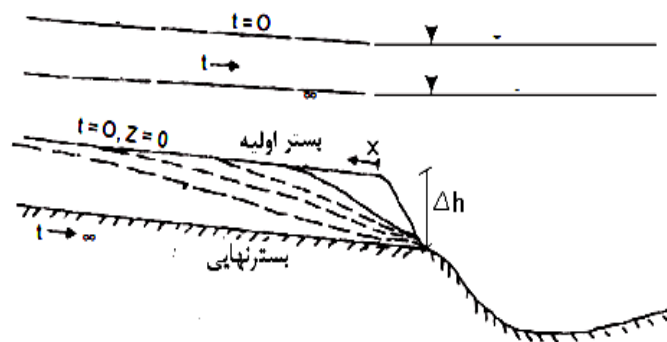
یا

$$\frac{\partial z}{\partial t} - K(t) \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0 \quad (25)$$

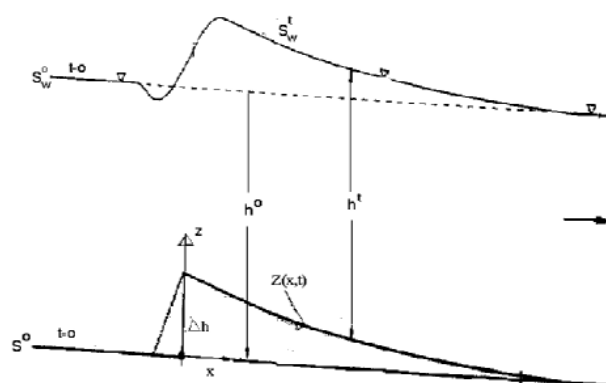
که در آن:

$$K(t) = \frac{1}{(1-\lambda_0)} \frac{\partial q_b}{\partial U} \left(\frac{Cq^2}{3U^2} \right) \quad (26)$$

معادله (۲۵) را معادله انتشار می‌نامند. این معادله به شکل معادلات لاپلاس قابل حل بوده و $K(t)$ ضریب انتشار نامیده می‌شود. لازم به ذکر است که معادله (۲۵) معادله‌ای کلی است که حل تحلیلی آن به روش‌های مختلفی توسط (Garde (2006), Ashida and Michiue (1971), Ribberink and Sande Jaramillo and Jain (1984) (1985)، Gill (1987) و Graf (1998) ارائه شده و برخی از جواب‌ها نیز شبیه به هم هستند. تفاوت معادلات در مقدار $K(t)$ است که بسته به شرایط اولیه و مرزی مسأله ممکن است متفاوت باشند و جواب‌های مختلفی به دست آید. معادله (۲۵) توسط (Parker et al. (2007) و Wong and Parker (2006) به صورت عددی نیز حل شده است.



شکل ۱ ترازگاهی بستر



شکل ۲ ترازافزایی بستر

$$\frac{\partial q_b}{\partial t} - K_0 \frac{\partial^2 q_b}{\partial x^2} = 0 \quad (32)$$

$$q_b(x, 0) = q_{b0} \quad \text{for } x \geq 0 \quad \text{شرط اولیه:}$$

$$q_b(0, t) = q_{bf} \quad \text{for } t > 0 \quad \text{شرایط مرزی:}$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} q_b(x, t) = q_{b0} \quad \text{و}$$

Jaramillo and Jain (1984) جواب معادله (۳۱) را به

صورت زیر ارائه کردند:

$$q_b(x, t) = q_{b0} + q_{bf} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{K_0 t}}\right) \quad (33)$$

با به دست آوردن بار بستر در هر مکان از بازه رودخانه (ناشی از منبع تغذیه رسوب در بالادست بازه، با استفاده از معادله (۳۳) و همچنین بار موضعی بستر رودخانه با استفاده از رابطه‌های انتقال رسوب، مقدار رسوب برداشت شده از بستر یا گذاشته شده بر روی بستر محاسبه می‌شود. با محاسبه این مقادیر می‌توان تراز بستر را با

برای شرایط ترازافزایی بستر، شرایط مرزی و اولیه با توجه شکل (۲) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$z(x, 0) = 0 \quad \text{شرایط اولیه:}$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} z(x, t) = 0 \quad \text{و} \quad z(0, t) = \Delta h(t) \quad \text{شرایط مرزی:}$$

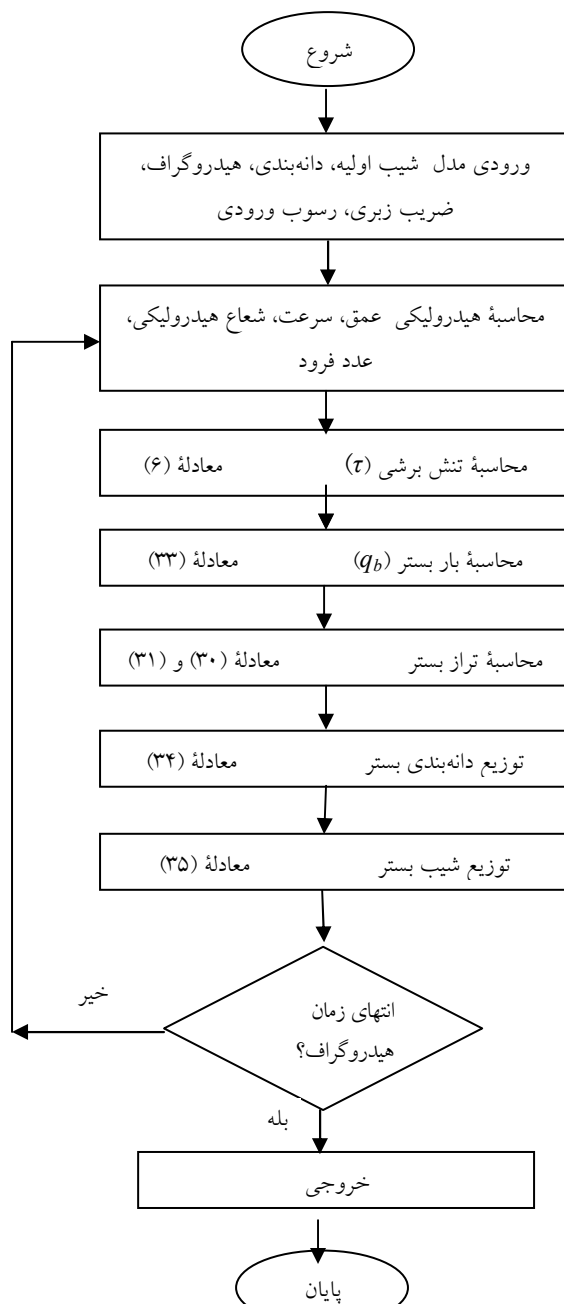
جواب معادله انتشار یعنی معادله (۲۴)، با استفاده از این

شرایط مرزی و شرایط اولیه به صورت زیر است:

$$z(x, t) = \frac{2\Delta q_b}{K_0(1-\lambda)} \left[\left(\frac{K_0 t}{\pi}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{x^2}{4K_0 t}\right) - \frac{x}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{K_0 t}}\right) \right] \quad (31)$$

بنابراین با استفاده از معادلات (۳۰) و (۳۱) می‌توان تغییرات تراز بستر را در هر زمان و مکان دلخواه از بازه رودخانه محاسبه کرد. برای محاسبه معادلات (۳۰) و (۳۱) به مقادیر بار بستر نیاز است. به طور مشابه می‌توان نشان داد:

استفاده شده است. (Hassan et al. (2006) آزمایشهایی را در فلومی به طول ۹، عرض ۰/۶ و عمق ۰/۵ متر انجام دادند. ذرات بستر غیریکنواخت و اندازه ذرات بین ۰/۱۸ تا ۴۵ میلی‌متر بود. در جدول ۱ ویژگی‌های جریان به‌طور خلاصه آورده شده است. در این آزمایشها، J1 هیدروگراف متقارن و C2 هیدروگراف نامتقارن را نشان می‌دهد.



شکل ۳ روندنما و ساختار مدل

استفاده از روابط (۳۰) و (۳۱) محاسبه کرد. دو مجهول باقی می‌ماند: ۱- تغییرات دانه‌بندی بستر برای هر گروه ذرات در مدت فرایند ترازکاهی و ترازافزایی بستر و ۲- شیب بستر در هنگام تغییر تراز بستر رودخانه. با ترکیب معادلات (۳) و (۴) و ساده‌سازی آنها، معادله زیر برای محاسبه توزیع دانه‌بندی بستر در هر زمان به‌دست می‌آید:

$$f_i(t) = f_i(0) + (t_i - p_i) \frac{z(t) - z(0)}{L_a} \quad (34)$$

برای محاسبه شیب بستر در مدت فرایند ترازکاهی یا ترازافزایی بستر، با فرض آن که تغییر تراز بستر به‌صورت چرخشی و حول نقطه‌ای در پایین دست بازه رخ می‌دهد، شیب بستر را در هر لحظه می‌توان محاسبه کرد:

$$S(t) = S_0 - \frac{z(t)}{L} \quad (35)$$

بنابراین با استفاده از این معادلات می‌توان تغییر بستر رودخانه، شامل تغییر شیب، بار بستر، تراز و دانه‌بندی بستر را در هر زمان و مکان دلخواه در بازه رودخانه محاسبه کرد. هنگامی که تغییر پایان یافته و رودخانه به شرایطی پایدار برسد، رودخانه مسلح شده است. معیار کمی برای تعیین اینکه بستر به شرایط پایدار رسیده یا خیر، مقدار بار بستر در زمانهای مختلف است. شکل ۳ روندنما و ساختار مدل را نشان می‌دهد.

۱- تحلیل نتایج

۱-۴- واسنجی مدل

برای صحت‌سنجی مدل از داده‌های آزمایشگاهی Hassan et al. (2006) در جریان ناپایدار و Chin et al. (1994) دبی پایدار جریان استفاده شده است. نتایج آزمایشگاهی این محققان در شرایط بدون رسوب ورودی است. به‌منظور ارزیابی توانایی مدل در پیش‌بینی تغییرات بستر با وجود رسوب ورودی، از داده‌های آزمایشگاهی Soni et al. (1980) و مدل تحلیلی Jaramillo and Jain (1984)

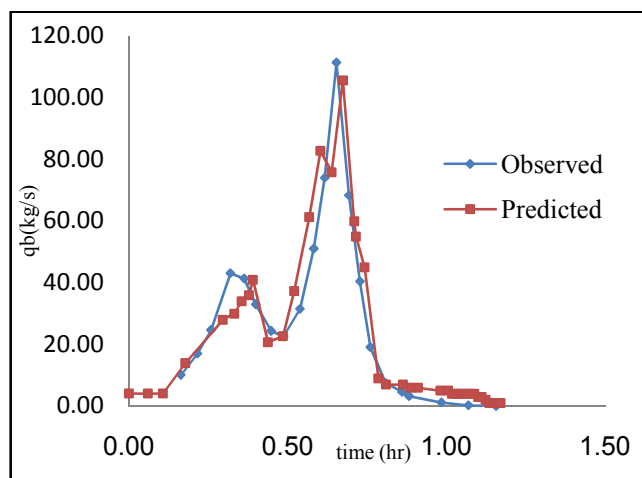
در شاخه نزولی هیدروگراف، نرخ انتقال رسوب با شیب بیشتری نسبت به شاخه صعودی کاهش یافته است. نکته قابل توجه در این شکل آن است که با وجود شکل متقارن هیدروگراف، نرخ انتقال رسوب تمایل به عدم تقارن دارد. نبود تقارن در نرخ بار بستر را می توان چنین توجیه کرد که در شاخه صعودی با افزایش جریان، نرخ انتقال رسوب افزایش می یابد و در نقطه اوج هیدروگراف به حداکثر مقدار می رسد. با توجه به این که با گذشت زمان بستر درشت دانه تر می شود، بنابراین نرخ انتقال رسوب کاهش می یابد. نتیجه این است که چند عامل سبب می شود که شیب نرخ انتقال در شاخه نزولی بیشتر از شاخه صعودی باشد: کاهش جریان و درشت دانه شدن بستر. توجیه دیگری برای این عدم تشابه در تقارن بار رسوبی و هیدروگراف جریان، تاخیر زمانی تغییرات بستر، در نتیجه بار رسوبی، نسبت به تغییرات جریان است.

آزمایشهای (Chin et al. (1994) در فلومی به طول ۱۹، عرض ۰/۴۵، و عمق ۰/۴۴ متر انجام شده است. اندازه ذرات بین ۰/۱۵ تا ۳۷/۵ میلی متر بوده و در آن، از آزمایش ۱-۳ برای صحت سنجی استفاده شده است. لازم است گفته شود که در این مقاله، فقط نتایج صحت سنجی مدل برای معادله بار بستر Meyer-Peter and Müller (1948) آورده شده است.

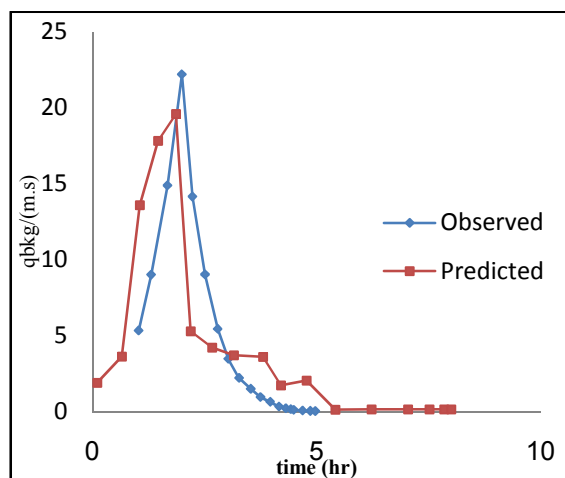
شکل های ۴ و ۵ نرخ انتقال بار بستر را از زمان شروع تا انتهای هیدروگراف نشان می دهد. در شکل ۴ نرخ انتقال بار بستر هیدروگراف C2 که نامتقارن است نشان داده شده است. در شاخه صعودی هیدروگراف نرخ انتقال رسوب با افزایش جریان افزایش می یابد و پس از دبی اوج جریان، انتقال رسوب نیز کاهش می یابد. در هیدروگراف J1 که متقارن است، با توجه به شکل ۵ در شاخه صعودی، انتقال رسوب افزایش می یابد تا به حداکثر مقدار می رسد.

جدول ۱ ویژگی های جریان در آزمایش های Hassan et al. (2006)

آزمایش	زمان هیدروگراف (ساعت)	حداکثر دبی (m ³ /s)	حداقل دبی (m ³ /s)	شیب (×۱۰ ^۳)	زمان رسیدن به دبی حداکثر (ساعت)
J1	۱/۱۷	۰/۰۴	۰/۰۱۴	۵	۰/۵
C2	۸	۰/۰۳۴	۰/۰۰۸	۵	۱



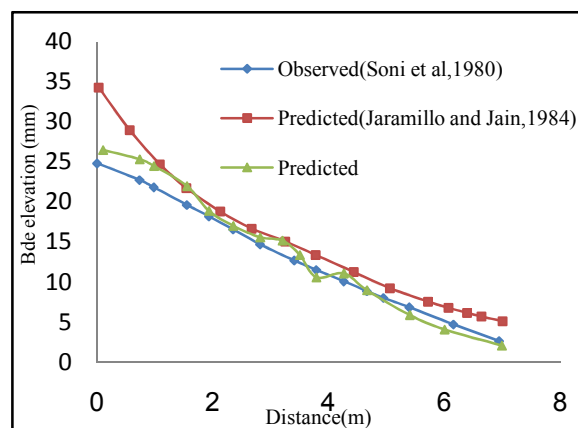
شکل ۵ تغییرات بار بستر در آزمایش J1 و مدل



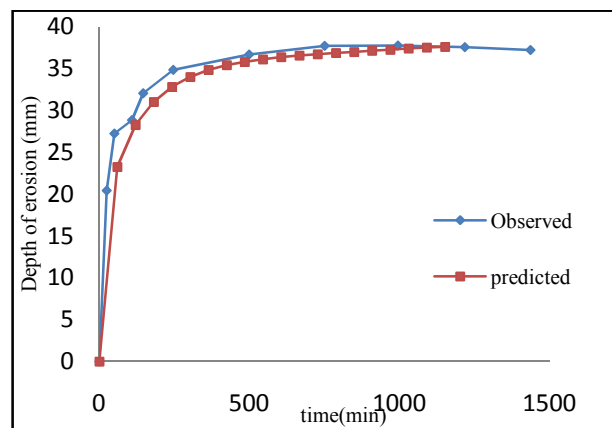
شکل ۴ تغییرات بار بستر در آزمایش C2 و مدل

در شکل‌های ۸ تا ۱۱ منحنی دانه‌بندی ذرات بستر نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها، توزیع دانه‌بندی ذرات بستر به‌خوبی توسط مدل پیش‌بینی شده است. با توجه به شکل ۹، ذرات درشت‌دانه بهتر از ذرات ریزدانه مدل‌سازی شده است. با مقایسه شکل‌های ۱۰ و ۱۱ که دانه‌بندی بستر را برای یک آزمایش در دو زمان متفاوت نشان می‌دهد، نتیجه می‌شود که با گذشت زمان، دانه‌بندی ذرات بستر بهتر مدل‌سازی شده است. در این مقاله دو پارامتر r (توان تابع پنهان‌شدگی) و k (ضریب معادله بار بستر Meyer-Peter and Müller, 1948) برای صحت‌سنجی مدل انتخاب شده است. نتایج صحت‌سنجی مدل نشان می‌دهد که k برابر ۱/۹۷ و r برابر ۰/۶۵- بهترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

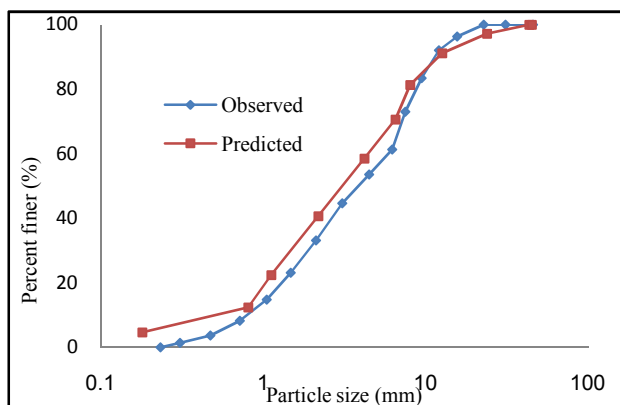
شکل ۶ عمق فرسایش بستر را برای آزمایش Chin et al. (1994) نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶، مدل به‌طور مناسبی عمق نهایی بستر را پیش‌بینی کرده است. شکل ۷ نتایج مقایسه مدل را با داده‌های آزمایشگاهی Soni et al (1980) و مدل تحلیلی Jaramillo and Jain (1984) نشان می‌دهد. این شکل تغییرات تراز بستر را در طول کانال نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، مدل تحلیلی ارائه شده بهتر از مدل Jaramillo and Jain (1984) داده‌های آزمایشگاهی را پیش‌بینی کرده است. دلیل دقت بهتر مدل آن است که در مدل ارائه شده، معادله بار بستر با درج تابع پنهان‌شدگی ذرات به کار گرفته شده است؛ در صورتی‌که در مدل Jaramillo and Jain (1984) از تابع پنهان‌شدگی ذرات استفاده نشده است.



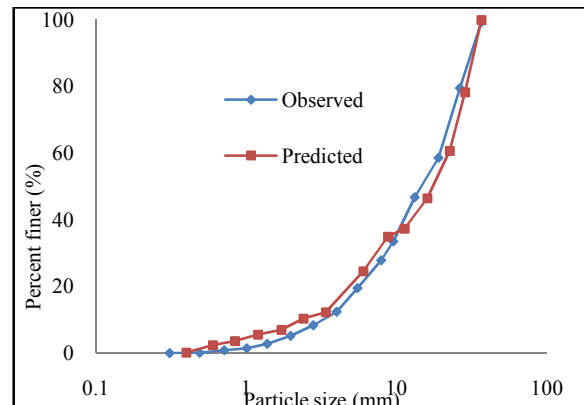
شکل ۷ تغییرات تراز بستر در طول کانال در $t=30$ min



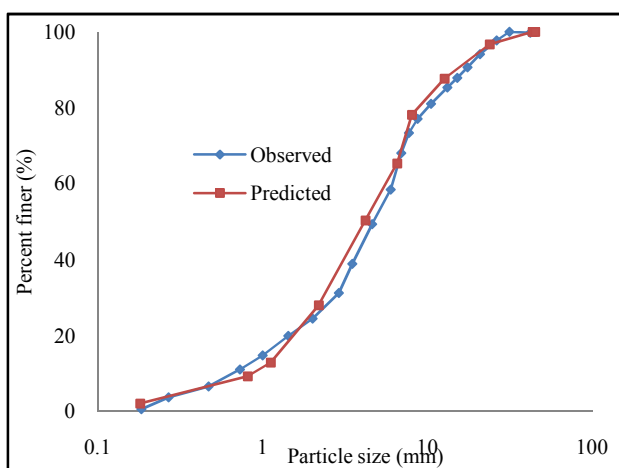
شکل ۶ تغییرات عمق چاله فرسایش در طول زمان



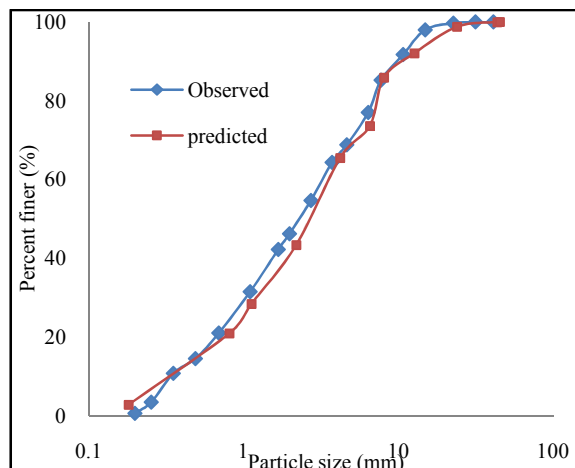
شکل ۹ دانه‌بندی بستر در آزمایش J1 و مدل در لحظه $t=1.17$ hr



شکل ۸ دانه‌بندی بستر مسلح



شکل ۱۱ دانه‌بندی بستر در آزمایش C2 و مدل در لحظه $t=6hr$



شکل ۱۰ دانه‌بندی بستر در آزمایش C2 و مدل در لحظه $t=3hr$

۲-۴- تحلیل حساسیت مدل

در این بخش چهار پارامتر τ ، k ، معادله انتقال رسوب و رسوب ورودی برای تحلیل حساسیت مدل انتخاب و نتایج در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ آورده شده است. با توجه به شکل ۱۲ دیده می‌شود که مدل نسبت به تابع پنهان‌شدگی ذرات حساس است. با توجه به رابطه تابع پنهان‌شدگی ذرات، τ بین ۰ و -۱ است. با افزایش τ بستر درشت‌دانه‌تر می‌شود و هرچه τ کاهش یابد بستر ریزدانه‌تر می‌شود (Parker, 2006).

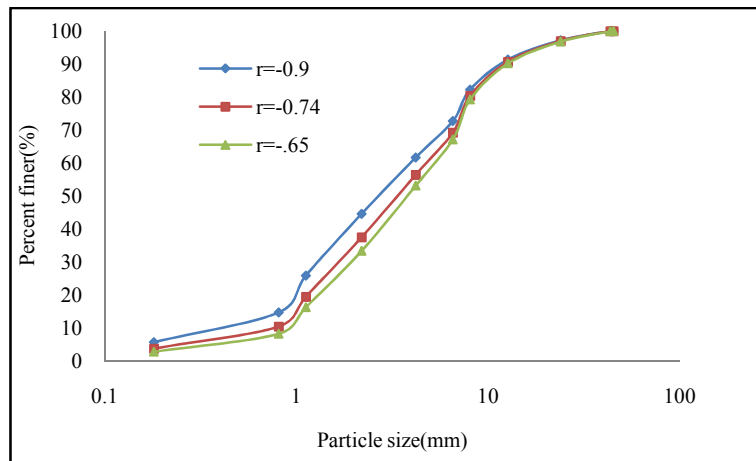
افزایش τ یعنی تمایل به سمت صفر، بدین مفهوم است که بستر یکنواخت‌تر باشد و با کاهش آن درجه غیریکنواختی ذرات بیشتر می‌شود. بنابراین شکل ۱۲ را می‌توان چنین توجیه کرد که با افزایش پارامتر τ و غیریکنواخت‌تر نشان دادن بستر، بر طبق معادله تابع پنهان‌شدگی ذرات، نتش برشی بحرانی ذرات ریزدانه کاهش می‌یابد و بنابراین احتمال حرکت این ذرات افزایش یافته و در نتیجه بستر درشت‌دانه می‌شود.

شکل ۱۳ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نسبت به پارامتر k را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود مدل نسبت به این پارامتر حساسیت کمتری نشان داده و با تغییر آن، دانه‌بندی بستر، بسیار کم تغییر کرده

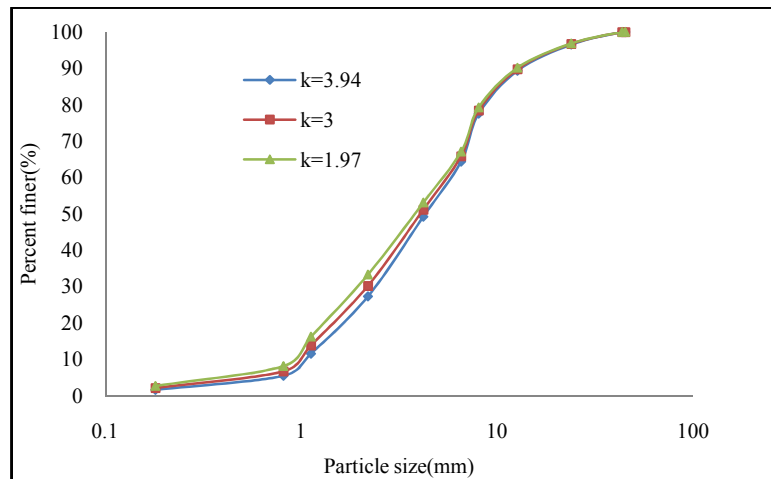
است. نکته جالب توجه در این شکل آن است که با افزایش k بستر درشت‌دانه‌تر می‌شود. با توجه به معادله باربستر انتظار داریم که با افزایش k ، مقدار بار بستر افزایش یافته و با افزایش بار بستر باید بستر درشت‌دانه‌تر شود. شکل ۱۳ نیز این نتیجه‌گیری را تأیید می‌کند.

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ منحنی دانه‌بندی بستر در زمان‌های $t=1hr$ و $t=2hr$ از شروع آزمایش نشان داده شده است. این منحنی‌ها با به‌کارگیری معادلات بار بستر Meyer-Peter and Müller (1948)، Schoklitsch (1943) برای هیدروگراف C2 با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

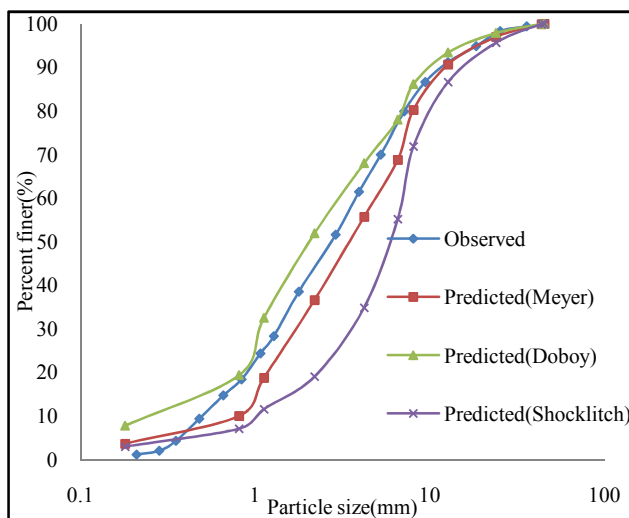
شکل ۱۴ توزیع دانه‌بندی بستر را در زمان یک ساعت پس از شروع آزمایش برای هیدروگراف C2 نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۴ به نظر می‌رسد که ذرات درشت‌دانه در ابتدای آزمایش بهتر از ذرات ریزدانه مدل‌سازی شده‌اند و هرچه از شروع آزمایش بگذرد، پیش‌بینی ذرات ریزدانه بستر نیز بهتر مدل‌سازی می‌شود (شکل‌های ۱۴ و ۱۵). به‌منظور تحلیل حساسیت مدل، تأثیر رسوب ورودی بر شیب بستر مطالعه شد.



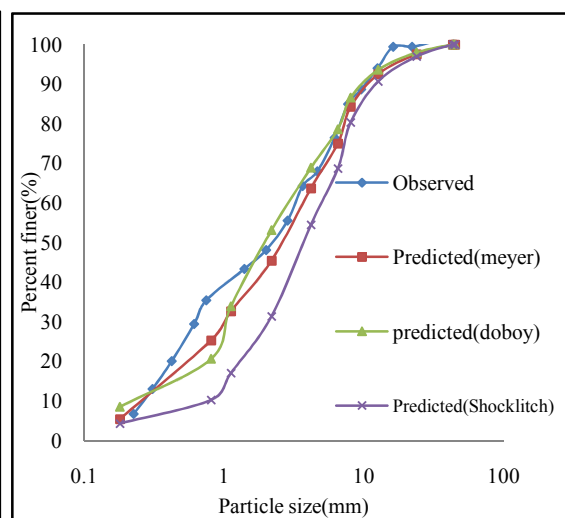
شکل ۱۲ تحلیل حساسیت مدل نسبت به ضریب تابع پنهان‌شدگی (r)



شکل ۱۳ تحلیل حساسیت مدل نسبت به ضریب k



شکل ۱۵ دانه‌بندی بستر در لحظه $t=2hr$ (آزمایش C2 و مدل)

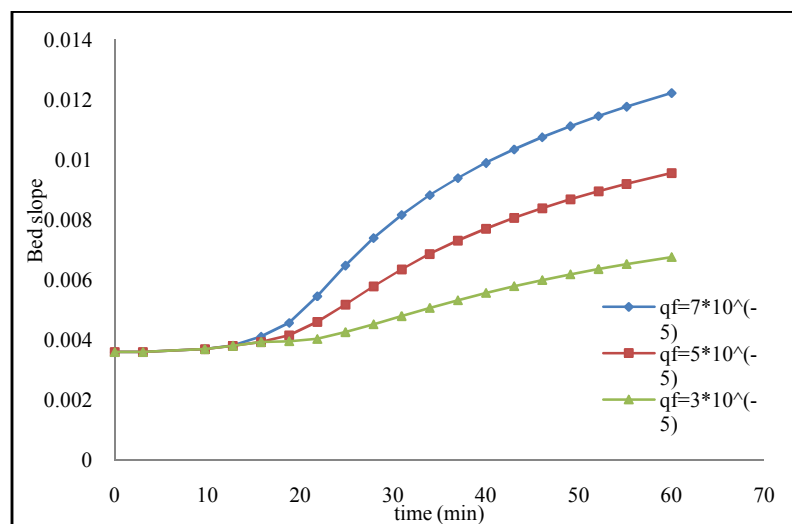


شکل ۱۴ دانه‌بندی بستر در لحظه $t=1hr$ (آزمایش C2 و مدل)

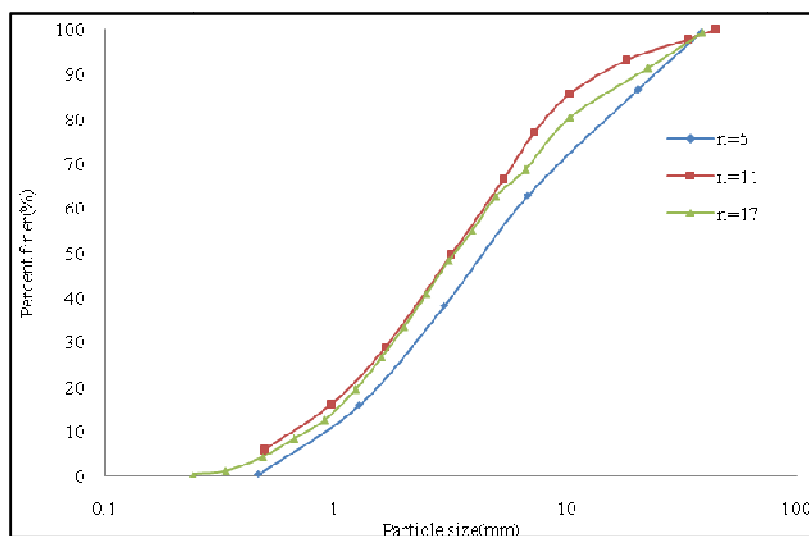
گروه در شکل ۱۷ رسم شده که در آن، n تعداد پلکان هیدروگراف است. با توجه به شکل، تعداد پنج پلکان با ۱۱ و ۱۷ پلکان تفاوت آشکاری دارد اما نتایج ۱۱ و ۱۷ پلکان بسیار به هم نزدیک است. نتایج این آزمایش و آزمایش‌های انجام شده روی تعداد زیادی از هیدروگراف‌ها نشان می‌دهد که افزایش تعداد پلکان هیدروگراف جریان تا یک حد مشخص، نتایج مدل را دقیق‌تر می‌کند و پس از آن، افزایش تعداد پلکان تأثیر چندانی بر نتایج ندارد.

با توجه به شکل ۱۶، با افزایش رسوب ورودی، شیب بستر افزایش یافته است. دلیل این افزایش آن است که بر طبق فرضهای مدل، تغییرات تراز بستر حول نقطه‌ای در پایین‌دست بازه اتفاق می‌افتد. بنابراین با افزایش رسوب ورودی، تراز بستر نیز افزایش می‌یابد و بر طبق این فرض، شیب بستر نیز افزایش می‌یابد.

به‌منظور تحلیل حساسیت مدل نسبت به تعداد پلکان هیدروگراف جریان، منحنی دانه‌بندی مواد بستر در زمان‌های مختلف از شروع سیلاب برای ۵، ۱۱ و ۱۷



شکل ۱۶ تحلیل حساسیت مدل نسبت به رسوب ورودی

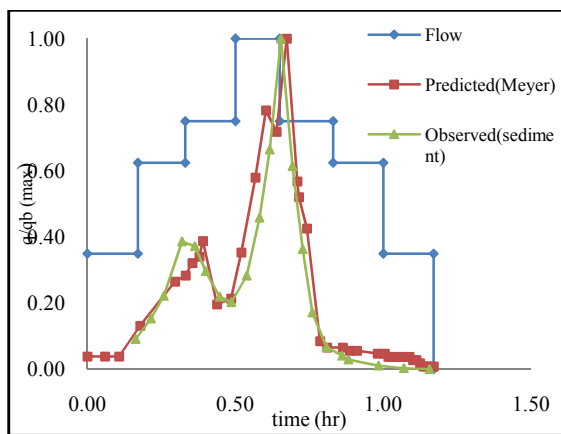


شکل ۱۷ آنالیز حساسیت مدل نسبت به تعداد پلکان هیدروگراف جریان

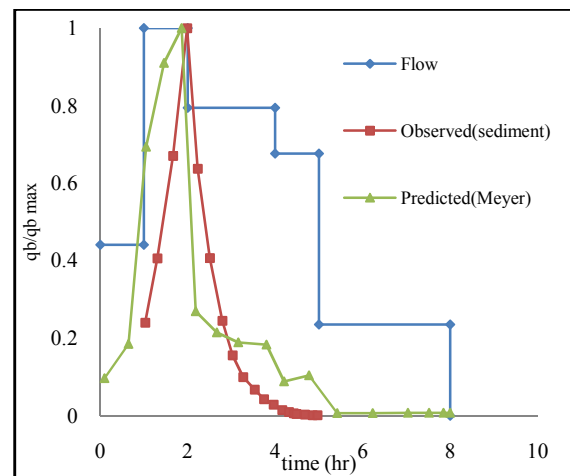
۳-۴- کاربرد مدل

برای بررسی محل حداکثر دبی رسوب نسبت به حداکثر دبی جریان، در شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ نمودار بدون بعد بار بستر و هیدروگراف جریان ترسیم شده است. بر طبق شکل ۱۸ معادله Meyer-Peter and Müller (1948) خوبی توانسته محل حداکثر بار بستر را محاسبه کند. توجه به این شکل، محل حداکثر دبی رسوب در انتهای حداکثر دبی جریان می‌باشد.

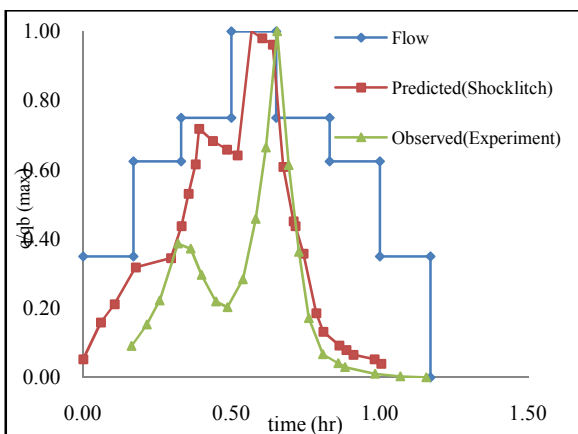
اما معادله Schoklitsch (1943) محل حداکثر بار بستر را به خوبی پیش‌بینی نکرده است. به نظر می‌رسد که معادله Meyer-Peter and Müller (1948) توانسته به خوبی بار انتقالی از بستر را مدل‌سازی کند. البته این نتیجه منطقی نیز به نظر می‌رسد، زیرا معادله Meyer-Peter and Müller (1948) برای ذرات درشت‌دانه به دست آمده است، در حالی که معادله Schoklitsch (1943) برای ذرات کوچکتر از ۷ میلی‌متر به دست آمده است.



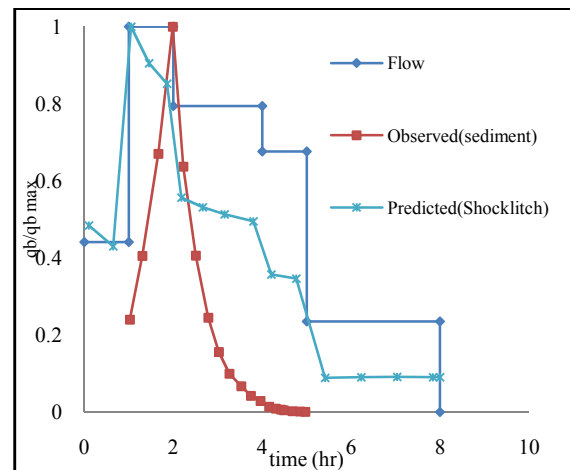
شکل ۲۰ نمودار بدون بعد باربستر و هیدروگراف جریان (آزمایش J1 و مدل) (معادله Meyer)



شکل ۱۸ نمودار بدون بعد باربستر و هیدروگراف جریان (آزمایش C2 و مدل) (معادله Meyer)

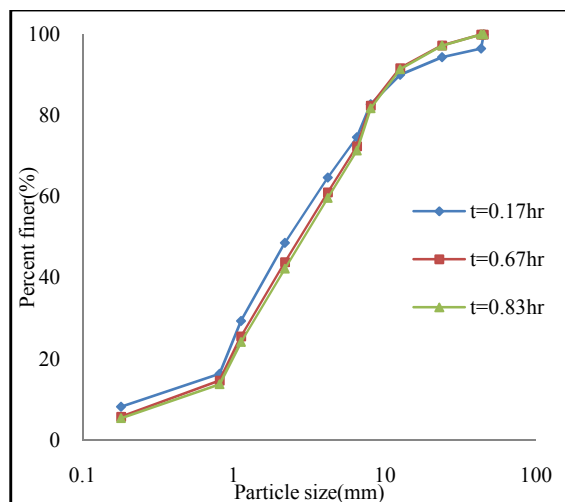


شکل ۲۱ نمودار بدون بعد باربستر و هیدروگراف جریان (آزمایش J1 و مدل) (معادله Shocklitch)

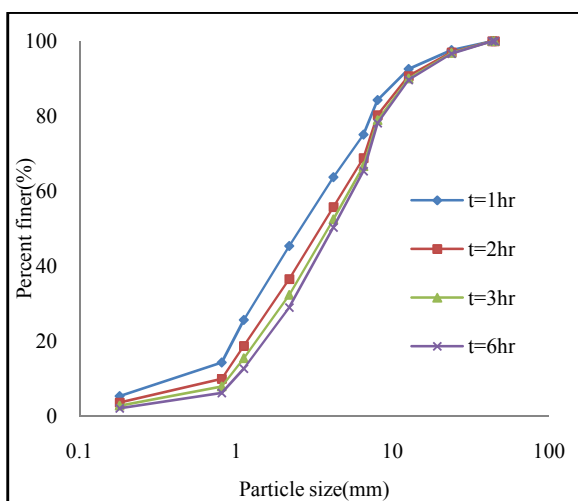


شکل ۱۹ نمودار بدون بعد باربستر و هیدروگراف جریان (آزمایش C2 و مدل) (معادله Shocklitch)

درصد برای ذرات ریزدانه و حداقل خطا برابر ۳ درصد برای ذرات درشت‌دانه است. جدول ۳ مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی مدل برای حداکثر بار بستر و زمان رسیدن به حداکثر بار بستر را نشان می‌دهد.



شکل ۲۲ درشت‌دانه شدن بستر (آزمایش J1 و مدل)



شکل ۲۳ درشت‌دانه شدن بستر (آزمایش C2 و مدل)

۱- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدلی تحلیلی برای پیش‌بینی تغییرات بستر (تراز، شیب، بار و توزیع دانه‌بندی) رودخانه ارائه شد. این مدل می‌تواند شرایط واقعی رودخانه شامل غیردائمی بودن جریان، رسوب ورودی از بالادست و غیریکنواختی ذرات بستر را شبیه‌سازی کند.

با استفاده از منحنی دانه‌بندی بستر در زمان‌های مختلف نیز می‌توان توسعه مسلح شدن بستر را مشاهده کرد. توزیع دانه‌بندی بستر در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ نشان داده شده است. شکل ۲۲ تغییرات دانه‌بندی بستر را برای هیدروگراف متقارن J1 در زمان‌های $t=0.17hr$ ، $t=0.63hr$ و $t=0.83hr$ از شروع سیلاب نشان می‌دهد. در این شکل، تغییرات دانه‌بندی بستر در طول زمان سیلاب قابل ملاحظه نیست و دانه‌بندی نهایی بستر تقریباً شبیه به بستر اولیه است. البته یکی از دلایل عدم تغییر دانه‌بندی بستر را می‌توان مدت زمان کم هیدروگراف دانست.

نتایج برای هیدروگراف نامتقارن C2 در شکل ۲۳ نشان داده شده است. بیشترین تغییرات در دو ساعت اول اتفاق افتاده و با گذشت زمان از میزان تغییرات کاسته شده، به طوری که در حد فاصل زمان‌های ۳ تا ۸ ساعت از شروع سیلاب تغییرات بسیار کم است. این بیانگر آن است که بستر در حال مسلح شدن است. با توجه به شکل ۲۳ می‌توان چنین نتیجه گرفت که مسلح شدن بستر در شاخه نزولی هیدروگراف اتفاق افتاده است.

توجه شود که شکل‌های ۲۲ و ۲۳ با استفاده از معادله Meyer-Peter and Müller (1948) به دست آمده است. نکته دیگر آن است که در فرایند درشت‌دانه شدن بستر، تمامی ذرات رسوب بستر اصلی در بستر درشت‌دانه با درصد متفاوت موجود است که این در مطالعات سایر محققان نیز تأیید شده است (Parker et al., 2007).

۴-۴- خطای مدل

به منظور ارزیابی دقیق‌تر مدل، مقادیر خطای مدل به طور خلاصه در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است. مقایسه این دو جدول بیانگر دقت مناسب جواب‌های محاسبه شده با مدل است. جدول ۲ مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی مدل را برای d_{16} و d_{50} ، d_{84} نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲، ذرات درشت‌دانه بهتر شبیه‌سازی شده‌اند. با توجه به جدول ۲ حداکثر درصد خطا برابر ۱۹

جدول ۲ درصد خطای اندازه ذرات

D16(mm)			D50(mm)			D84(mm)			عنوان
درصد خطا	پیش بینی شده	مشاهداتی	درصد خطا	پیش بینی شده	مشاهداتی	درصد خطا	پیش بینی شده	مشاهداتی	
۱۹/۱۹	۰/۸۸	۱/۱۱	۲۰/۷۷	۳/۰۹	۳/۹	۵/۴۸	۹/۱۴	۹/۶۷	آزمایش J۱ (t=۱/۱۷hr)
۳/۷۳	۰/۵۶	۰/۵۴	۱۶/۹۶	۲/۶۹	۲/۳	۳/۱۱	۷/۶۲	۷/۳۹	آزمایش C۲ (t=۳hr)
۱۸/۵۲	۱/۲۸	۱/۰۸	۱۱/۶۸	۴/۱۶	۴/۷۱	۱۵/۳۲	۱۰/۵	۱۲/۴	آزمایش C۲ (t=۶hr)

جدول ۳ درصد خطای بار بستر

زمان رسیدن به بار بستر حداکثر (hr)			بار بستر حداکثر (g/(s.m))			عنوان
درصد خطا	پیش بینی شده	مشاهداتی	درصد خطا	پیش بینی شده	مشاهداتی	
۲۰/۷۷	۳/۰۹	۳/۹	۵/۴۸	۹/۱۴	۹/۶۷	آزمایش J۱ (t=۱/۱۷hr)
۱۶/۹۶	۲/۶۹	۲/۳	۳/۱۱	۷/۶۲	۷/۳۹	آزمایش C۲ (t=۳hr)
۱۱/۶۸	۴/۱۶	۴/۷۱	۱۵/۳۲	۱۰/۵	۱۲/۴	آزمایش C۲ (t=۶hr)

- در رودخانه های فصلی که شیب شاخه های صعودی و نزولی هیدروگراف زیاد است، گام زمانی باید کوچکتر باشد، اما برای هیدروگراف هایی که شیب شاخه های صعودی و نزولی هیدروگراف کمتر باشد، می توان گام زمانی را بزرگتر در نظر گرفت. با وجود این نتایج تحلیل حساسیت نشان می دهد که تعداد گام زمانی بین ۵ تا ۱۵ مناسب است.

۲- فهرست علائم

a	مقدار ثابت
A	سطح مقطع جریان
b	مقدار ثابت
B	عرض رودخانه
C_s	غلظت مواد معلق موجود در آب
d_{16}, d_{50}, d_{84}	قطر ذره ای که به ترتیب ۵۰، ۱۶ و ۸۴ درصد d_{16}, d_{50}, d_{84} ذرات از آن کوچکتر است
$erfc()$	تابع خطای مکمل
f_i	کسر مربوط به گروه i ام رسوبهای موجود در مواد اولیه بستر
G_s	چگالی نسبی ذرات رسوب
h	عمق جریان
k	ضریب بار بستر

مقادیر پیش بینی شده توسط مدل، تطابق مناسبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد.

یکی از محدودیت های این مدل، ثابت فرض کردن رسوب ورودی از بالادست است. همچنین محاسبات این مدل بر فرض مستقیم بودن بازه رودخانه استوار است و بررسی این معادلات در پیچان رودها می تواند موضوع مطالعه در آینده باشد. نتایج زیر از مدل تحلیلی به دست آمده است:

- در جریان های با $Fr < 0.8$ مدل تحلیلی، جواب های قابل قبولی را ارائه می کند و با افزایش عدد فرود، خطای مدل افزایش می یابد.

- رسوبهای ورودی از بالادست، پارامتری بسیار مؤثر در مدل است.

- تابع پنهان شدگی ذرات در شبیه سازی بسترهای غیریکنواخت مؤثر است.

- معادله انتقال بار بستر Meyer-Peter and Müller (1948)، قابلیت بیشتری را در مقایسه با سایر معادلات، در شبیه سازی بار انتقالی و روند تغییر آن نشان داده است.

- با افزایش رسوب ورودی از بالادست، شیب بستر افزایش می یابد.

Al-Khalif S. M. (1965). Study of open channels degradation and corresponding bed roughness, PhD Thesis, University of California.

Ashida K. and Michiue M. (1971), An investigation of the river bed degradation downstream of a dam, Proc. IAHR, 14th Congress, Paper C-30, Paris, August 29-September 3, 1971, pp. 245-255.

Chin C.O., Melville B.W. and Raudkivi A.J., (1994). "Stream bed armouring", J. of Hydr. Eng., ASCE, Vol 120, No. 8, pp. 899-918.

de Vries M. (1965). Consideration about non-steady bed load transport in open channels, XI Congress, Int Assoc. of Hydraul. Eng. and Res. St. Petersburg, Russia.

de Vries M. (1973). River Bed Variation-Aggradation and Degradation, Publ. 107, Delft Hydraulic Lab. Delft, the Netherlands.

Einstein H. A. (1950). The Bed Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows. Technical Bulletin no. 1026, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

Jaramillo W. F. and Jain S. C. (1984). Aggradation and degradation of alluvial channel beds, J. Hyd., ASCE, 110(8), pp. 1072-1085.

Hassan M., Egozi R. and Parker G. (2006). Experiments on the effect of hydrograph characteristics on vertical grain sorting in gravel bed rivers, Water Resources Research.

Garde R. J. (2006). River Morphology, New Age International (P) Ltd, New Delhi.

Gill M. A. (1987). Nonlinear solution of aggradation and degradation in channels, Journal of Hydraulic Research, 25(5), pp. 537-547.

Graf W. H. (1998). Fluvial Hydraulics, John Wiley & Sons Ltd, New York.

Krishnappan B. G. (1985). Modeling of unsteady flows in alluvial streams. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 111(2), pp. 257-266.

Newton C. T. (1951). An experimental investigation of bed degradation in an open channel. Boston Society of Civil Engineers, Boston.

Parker G., Hassan M. A. and Wilcock P. (2007). Adjustment of the bed surface size distribution of gravel-bed rivers in response to cycled hydrographs, Earth Surface Processes, Vol. 11, pp. 241-285

Parker G. (2006). "Parker's Chapter 3 for ASCE Manual 54".

$K(t)$	ضریب انتشار
L	طول بازه رودخانه
L_a	ضخامت لایه فعال
p_i	کسر مربوط به کلاس i ام رسوبات موجود در لایه فعال بستر
q	دبی در واحد عرض جریان
q_b	بار بستر در واحد عرض
q_{cr}	دبی بحرانی جریان در آستانه حرکت
q_{bi}	بار بستر در واحد عرض گروه i ام ذرات
q_{sl}	دبی رسوب ورودی از شاخه جانبی
Q	دبی جریان
Q_s	نرخ انتقال رسوب
r	ضریب تابع پنهان شدگی ذرات
R	شعاع هیدرولیکی
S	شیب بستر
t	زمان
U	سرعت جریان
x	فاصله در جهت جریان
z	تراز بستر
λ	تخلخل بستر
λ_0	تخلخل اولیه بستر
ε_i	تابع پنهان شدگی ذرات
τ_{cr}	تنش برشی بحرانی بستر
τ_i	تنش برشی بستر مربوط به گروه i -ام
τ_{*i}	تنش برشی بی بعد مربوط به گروه i -ام
τ_{*cr}	تنش برشی بحرانی بدون بعد

۳- تشکر و قدردانی

از شرکت مدیریت منابع آب به سبب تأمین بخشی از هزینه‌های این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

۴- منابع

Adachi S. and Nakatoh T. (1969). Changes of top-set bed in a silted reservoir, Proc. of 13th congress of IAHR, Tokyo (Japan), Vol. 5.1, 3.16, pp. 269-272.

Wong M. and Parker G. (2006). One-dimensional modeling of morphodynamic bed evolution in a gravel-bed river subject to a cycled flood hydrograph, *JGR-Earth Surface*.

Wong M. and Parker G (2006). Reanalysis and correction of bed-load relation of Meyer-Peter and Müller using their own database, *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, November 2006, PP. 1159-1168.

Yang C. T. (1996). *Sediment Transport: Theory and Practice*. McGraw-Hill.

Ribberink J. S. and Van Der Sande J. T. M. (1985). Aggradations in rivers due to overloading-analytical approaches, *Journal of Hydraulic Research*, 23: 3, pp. 273-283.

Sibben (1999). A theoretical analysis on armoring of river beds, *Journal of Hydraulic Research*, 37(3), pp. 313-326

Soni J. P., Garde G. J. and Raju K. G. (1980). Aggradation in streams due to overloading. *J. Hyd. Division. ASCE*, 106(1), pp. 117-32.

Tinney E. R. (1955). A study of the mechanics of degradation of a bed of uniform sediment in an open channel, PhD. Thesis, University of Minnesota.