

Sensitivity Analysis of Total Sediment Load Transport Equations in Rivers

REZA AZIZI^{1*}, MAHMOOD SHAFAI BAJESTAN²

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2. Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water & Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

(Received: May. 15, 2021- Revised: July. 27, 2021- Accepted: Aug. 22, 2021)

ABSTRACT

In order to estimate the sediment transport discharge in rivers, empirical equations commonly are used. Variables of these equations are flow and sediment properties, such as flow depth and velocity, sediment grain size, or other properties. Estimation of sediment transport by using these equations is based on the measurement of the physical properties. In engineering applications, measuring errors of these properties affect the accuracy of sediment fluxes. The present study quantifies error propagation from the input properties and investigates its effect on the sediment transport calculations. This analysis determines the sensitivity, strengths and weaknesses of four total load equations, including: Engelund and Hansen, Shen and Hung, Molinas and Wu, and Yang and Lim. Due to non-linearity of most of the sediment transport equations, a Monte Carlo numerical method is used to compare these equations. Results show that among the input physical properties, flow velocity, sediment grain size, and roughness coefficient mostly affect the sediment fluxes, respectively. Variation of flow depth has the least effect on sediment transport estimations. Results also show that among four investigated equations, Molinas-Wu and Shen-Hung equations are the least and most sensitive to the errors in the input physical data, respectively. In most cases the deference between the Shen-Hung and Molinas-Wu equations is very high and about several hundred percent. Hence, it is recommended not to use the Shen-Hung equation for sediment flux estimation or in hydrodynamic models, except if the physical properties are measured with precision.

Keywords: Sediment Transport, Total Sediment Load, Error Propagation, Sensitivity Analysis, Monte Carlo Method.

* Corresponding Author's Email: re_azizi@ymail.com

حساسیت‌سنجی معادلات برآورد انتقال بار کل رسوب در رودخانه‌ها

رضا عزیزی^{*}، محمود شفاعی بجمستان^۲

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
۲. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۵/۵ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۵/۳۱)

چکیده

به منظور محاسبه‌ی دبی انتقال رسوب در رودخانه‌ها عمدتاً از معادلات تجربی استفاده می‌شود. متغیرهای به کار رفته در این معادلات خصوصیات جریان و رسوبات، مانند سرعت و عمق جریان، اندازه‌ی ذرات رسوب است. برآورد انتقال رسوب با استفاده از این معادلات نیز بر پایه‌ی اندازه‌گیری این خصوصیات صورت می‌گیرد. خطاهایی که در اندازه‌گیری‌های این خصوصیات رخ می‌دهد و در کاربردهای مهندسی معمول است، بر صحت محاسبات انتقال رسوب تأثیر می‌گذارد. در تحقیق حاضر، انتشار خطای موجود در خصوصیات فیزیکی ورودی و تأثیر آن در برآورد انتقال بار رسوب به صورت کمی بررسی شده است و بر اساس آن میزان حساسیت و نقاط ضعف و قوت چهار معادله‌ی انتقال بار کل رسوبات شامل: معادلات انگلند و هانسن، شن و هانگ، مولیناس و وو، و یانگ و لیم تعیین شده است. از آنجایی که معادلات تجربی انتقال رسوب معادلاتی غیرخطی هستند از روش عددی مونت کارلو برای مقایسه معادلات استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که از بین عوامل فیزیکی ورودی، به ترتیب، سرعت جریان، اندازه‌ی ذرات رسوب، و سپس ضریب زبری بیشترین، و تغییرات عمق جریان کمترین تأثیر را بر محاسبات انتقال رسوب دارند. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که از بین چهار معادله‌ی مورد بررسی، معادله‌ی مولیناس و وو کمترین و معادله‌ی شن و هانگ بیشترین حساسیت را نسبت به خطای موجود در داده‌های خصوصیات فیزیکی ورودی دارند. در بیشتر حالات مورد بررسی، تفاوت مشاهده شده بین معادله‌ی شن و هانگ و معادله‌ی مولیناس و وو بسیار زیاد و در حدود چند صد درصد است. بنابراین توصیه می‌شود به جز در شرایطی که اندازه‌گیری‌های عوامل فیزیکی به‌طور دقیق انجام شده است، معادله‌ی شن و هانگ به منظور محاسبه انتقال رسوب و یا استفاده در مدل‌های هیدرودینامیکی به کار برده نشود.

واژه‌های کلیدی: انتقال رسوب، بار کل رسوب، انتشار خطا، حساسیت‌سنجی، روش مونت کارلو.

مقدمه

سد از رسوبات پر می‌شود (Guertault and Fox, 2018). بنابراین عمر مفید سدها و بهره‌برداری مؤثر از آن‌ها به میزان ورود و انباشت رسوبات در مخازن سدها بستگی دارد و بهتر است تا در مرحله‌ی امکان‌سنجی ساخت هر سدی، برآورد دقیقی در خصوص آورد رسوبات از رودخانه‌های بالادست سد صورت پذیرد. از طرفی به دلیل فقدان اندازه‌گیری‌های کافی و دقیق، لازم است تا با استفاده از معادلات تجربی برآورد انتقال رسوب، مقدار رسوب ورودی به مخازن محاسبه شود.

تاکنون معادلات تجربی متعددی توسط محققان مختلف برای محاسبه‌ی مقدار انتقال رسوب ناشی از جریان در رودخانه‌ها و آبراهه‌های آبرفتی و نیز انتقال رسوب ناشی از امواج ارائه شده است که میزان کارایی و نتایج حاصل از آن‌ها بسیار با یکدیگر متفاوت است. از طرفی در دهه‌های اخیر با گسترش و رواج استفاده از مدل‌های ریاضی و نرم افزارهای رایانه‌ای یک بعدی، دو

رسوب‌گذاری مخازن سد، تجمع تدریجی بار رسوبی ورودی از رودخانه است. رسوب‌گذاری مسئله‌ای مهم در مناطق مختلف جهان به شمار می‌رود و پیامدهای زیادی در ارتباط با مدیریت آب، کنترل سیل، و تولید انرژی ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر، ورود رسوبات به مخازن سدها موجب کاهش ظرفیت ذخیره‌ی سد و بروز مشکلاتی در مدیریت منابع آبی، به‌ویژه در مناطق خشک می‌شود (Cimorelli, et al. 2021). پایداری^۱ مخازن سدها به دلیل کاهش ظرفیت ذخیره‌ی سدها در نتیجه‌ی تجمع پیوسته‌ی رسوبات در معرض خطر قرار می‌گیرد. سدهای بسیاری در حال پر شدن از رسوبات با سرعتی بیش از آن چیزی که بر مبنای آن طراحی شده‌اند هستند و ظرفیت ذخیره‌ی اولیه‌ای که برای نگهداشت رسوبات اختصاص داده می‌شود، کافی و جوابگو نیست، به‌گونه‌ای که حدود ۸۸ درصد ظرفیت سدها تا پایان عمر طراحی

^{*} نویسنده مسئول: re_azizi@ymail.com

وابستگی خطاهای معادلات انتقال رسوب، ناشی از متغیرهای ورودی، توسط افراد مختلفی ارائه شده‌اند (Bechteler and Maurer, 1990؛ Chang et al. 1993) اما کاربرد آن‌ها محدود است.

سؤال اساسی تحقیق حاضر این است که خطاهای موجود در داده‌های اندازه‌گیری شده تا چه مقدار بر آورد رسوبی محاسبه شده با استفاده از معادلات تجربی تأثیر می‌گذارند و نحوه‌ی انتشار خطاهای ورودی و نیز میزان تأثیرپذیری معادلات مختلف چگونه است. به عبارت دیگر در این تحقیق، میزان حساسیت معادلات تجربی انتقال رسوب نسبت به خطاهای داده‌های ورودی بررسی شده است. برای این منظور، در تحقیق حاضر از روش عددی مونت کارلو استفاده شده است، و تأثیر خطاهای موجود در خصوصیات فیزیکی رسوب و جریان در چهار معادله‌ی تجربی انتقال بار کل رسوب، شامل: معادله‌ی (Engelund and Hansen, 1967)، معادله‌ی (Shen and Hung, 1971)، معادله‌ی (Molinas and Wu, 2001)، و معادله‌ی (Yang and Lim, 2003) ارزیابی شده است. از معادله‌ی (Engelund and Hansen, 1967) برای انجام محاسبات تحلیلی و سپس مقایسه‌ی نتایج روش تحلیلی و روش عددی مونت کارلو، و صحت‌سنجی روش عددی استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

معادلات تجربی، انتقال رسوب را در حالت کلی به صورت زیر به عوامل ورودی مربوط می‌کند:

$$q = q(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \quad (\text{رابطه ۱})$$

در رابطه‌ی بالا، $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ خصوصیات فیزیکی هستند که شرایط رسوب، سیال یا جریان را توصیف می‌کنند. به منظور کمی‌سازی اثر خطای موجود در خصوصیات فیزیکی بر انتقال رسوب، هر یک از این خصوصیات به صورت یک متغیر تصادفی، که بر اساس یک توزیع آماری تعریف می‌شوند، نوشته می‌شوند. در مرحله‌ی بعد از این اطلاعات برای محاسبه و پیش‌بینی q استفاده می‌شود (Pinto et al., 2006).

روش مونت کارلو^۱ بر پایه‌ی تولید اعداد تصادفی استوار است. هدف این روش شبیه‌سازی یک مدل موجود (که در این تحقیق معادلات تجربی برآورد انتقال رسوب است) با استفاده از نمونه‌برداری تصادفی از توزیع خصوصیات فیزیکی ورودی با تعداد بسیار زیادی از نمونه‌ها و در نهایت محاسبه‌ی پاسخ خروجی است. روش مونت کارلو را می‌توان به صورت گام به گام در قالب مراحل زیر بیان نمود:

بعدی و سه بعدی برای شبیه‌سازی و بررسی هیدرولیک جریان، لزوم استفاده از معادلات برآورد انتقال رسوب نیز افزایش یافته است. در این شرایط بررسی کارایی و صحت نتایج و محاسبات انتقال رسوب با این معادلات ضروری است.

تاکنون محققان مختلف با روش‌های گوناگونی به ارزیابی عملکرد این معادلات پرداخته‌اند: (Van Rijn, 1984c, 1989) مقایسه‌ای را بین محاسبات معادلات برآورد انتقال رسوب و داده‌های میدانی حاصل از رودخانه‌ها انجام داده و نتایج را به صورت نسبت انتقال رسوب محاسبه شده و اندازه‌گیری شده ارائه کرده است. مقایسه‌ای نیز توسط (Soulisby, 1995) بین نتایج مدل عددی، داده‌های آزمایشگاهی و میدانی و معادله‌ی (Bailard, 1981) انجام شده است که نشان می‌دهد نتایج حاصل از مدل عددی و معادله‌ی تجربی مشابه است. برخی از تحقیقات نیز به شناسایی و بررسی منابع خطا در انتقال رسوب پرداخته‌اند. به عنوان مثال، (Camenen and Larroude, 2003) نشان دادند که معادلات انتقال رسوب نسبت به تغییرات کوچک در اندازه‌ی ذرات رسوب، و عدم تقارن جریان و امواج بسیار حساس هستند، به گونه‌ای که خطاهای کم در این خصوصیات، که در مطالعات و کاربردهای مهندسی معمول نیز هستند، می‌تواند به طور قابل توجهی نتایج نهایی را تحت تأثیر قرار دهد (Pinto et al., 2006). حساسیت‌سنجی معادلات تجربی موجود در زمینه‌های مختلف هیدرولیک، مانند انتقال رسوب (Nassar, 2011)، جریان آب در خاکریزها (Hosseini and Jahangiri, 2011)، آبشستگی پایه‌های پل (Cikojevic, et al., 2019) و ... موجب می‌شود تا میزان تأثیرپذیری این معادلات از نوسانات و خطاهای موجود در متغیرهای مستقل موجود در این معادلات تعیین و کارایی این معادلات مشخص گردد.

معادلات تجربی برآورد انتقال رسوب عمدتاً مبتنی بر داده‌های مربوط به خصوصیات فیزیکی رسوب و سیال و نیز مشخصات هیدرولیکی جریان، مقدار انتقال رسوب را محاسبه می‌کنند. گاهی هم ممکن است خطاها به مدل‌های دیگر مربوط باشند، یعنی در مواردی که تعدادی از عوامل ورودی با استفاده از مدل‌های دیگر محاسبه می‌شوند، به عنوان مثال ممکن است سرعت جریان با استفاده از مدل‌های هیدرودینامیکی تعیین شده باشند. بنابراین عدم قطعیت‌ها و خطاهای موجود در اندازه‌گیری‌ها و تعیین عوامل و متغیرهای ورودی معادلات انتقال رسوب، بر صحت نتایج این معادلات اثر می‌گذارد. تا به حال بعضی از روش‌هایی که بر پایه‌ی تحلیل‌های آماری هستند، برای بررسی

می‌دهد (Shafie Bajestan, 2008). در این تحقیق، چهار معادله‌ی انتقال بار کل رسوب در رودخانه‌های ماسه‌ای، شامل: معادله‌ی Engelund and Hansen (1967)، معادله‌ی Shen and Hung (1971)، معادله‌ی Molinas and Wu (2001) و معادله‌ی Yang (1971)، معادله‌ی and Lim (2003) ارزیابی شده‌اند. این معادلات در بخش‌های بعدی متن و نیز در شکل‌ها و نمودارها به ترتیب با علائم اختصاری EH، SH، MW، YL نشان داده شده‌اند.

الف) معادله Engelund and Hansen (1967)

این معادله به منظور برآورد انتقال بار کل رسوب و بر پایه‌ی مفهوم تبادل انرژی^۹ ارائه شده و فرم کلی آن به صورت زیر است (Gunawan et al. 2019):

$$g_t = 0.05\gamma_s \left[\frac{d_{50}}{g(G_s - 1)} \right]^{0.5} \left[\frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d_{50}} \right]^{1.5} \bar{u}^2 \quad (\text{رابطه ۵})$$

در رابطه‌ی بالا، g_t نرخ انتقال بار کل (بر حسب وزن در واحد زمان)، γ_s وزن مخصوص^{۱۰} یا وزن واحد حجم رسوب (بر حسب N/m^3)، γ وزن مخصوص آب (بر حسب N/m^3)، d_{50} قطر میانه‌ی ذرات رسوب^{۱۱} (بر حسب m)، G_s چگالی ویژه^{۱۲} رسوب (بدون بعد)، g شتاب گرانش (بر حسب m/s^2)، τ_0 تنش برشی بستر^{۱۳} (بر حسب Pa)، و \bar{u} سرعت متوسط جریان (بر حسب m/s) است. پس از محاسبه‌ی g_t با رابطه‌ی $q_t = g_t/\gamma_s$ دبی بار کل رسوب در واحد عرض جریان (بر حسب m^2/s) به دست می‌آید.

ب) معادله Shen and Hung (1971)

Shen and Hung فرض کردند که انتقال رسوب به اندازه‌ی پیچیده است که هیچ عدد رینولدز، عدد فرود و یا ترکیبی از آن‌ها را نمی‌توان یافت به طوری که بتوان فرآیند انتقال رسوب را در هر شرایطی توصیف کرد. به جای تلاش برای یافتن یک متغیر غالب که می‌تواند نرخ انتقال رسوب را کنترل نماید، آن‌ها با استفاده از مفاهیم آماری-احتمالاتی^{۱۴}، معادله‌ی رگرسیونی بر پایه‌ی ۵۸۷ سری داده‌ی آزمایشگاهی در دامنه‌ی اندازه‌ی ذرات ماسه‌ای را ارائه کردند. این معادله‌ی رگرسیونی^{۱۵} به صورت زیر بیان می‌شود (Monowar Hossain and Rahman, 1998):

$$\log C_t = -107404.45938 + 324214.74734Y - 326309.58909Y^2 + 109503.87233Y^3 \quad (\text{رابطه ۶})$$

۱. انتخاب توزیع آماری برای خصوصیات فیزیکی، ۲. انتخاب معادله‌ی انتقال رسوب، ۳. تعیین مشخصه‌ی فیزیکی که بررسی تأثیر آن مورد نظر است، ۴. تعیین دامنه‌ی کافی و مناسب و نیز مقادیر معرف متغیرهای فیزیکی ورودی، ۵. تعریف تعداد محاسبات انتقال رسوب در هر شبیه‌سازی به روش مونت کارلو، ۶. انتخاب معیارهای خطا برای انجام ارزیابی‌ها و مقایسه‌ی عملکرد معادلات انتقال رسوب.

امکان استفاده از روش مونت کارلو به این بستگی دارد که سیستم فیزیکی (یا ریاضی) مورد نظر با توابع چگالی احتمال^۱ قابل توصیف باشد. در این تحقیق برای توصیف خصوصیات فیزیکی ورودی از توزیع احتمال یکنواخت^۲ استفاده شده است. چگالی احتمال توزیع یکنواخت در یک بازه‌ی مفروض (a, b) ثابت و در سایر نقاط صفر است. پارامتر آماری $X \sim W(a, b)$ توسط نقاط انتهایی a و b ، و توزیع یکنواخت استاندارد $W(0, 1)$ تعیین می‌شود:

$$X = (b - a) \cdot W(0,1) + a \quad (\text{رابطه ۲})$$

نقاط انتهایی بازه، نقاط a و b ، بر مبنای مقدار میانگین μ و ضریب تغییرات^۳ α (نسبت بین انحراف از معیار استاندارد^۴ و مقدار میانگین) متغیر X تعیین می‌شوند:

$$a = \mu(1 - \alpha\sqrt{3}) ; b = \mu(1 + \alpha\sqrt{3}) \quad (\text{رابطه ۳})$$

با جایگذاری تعریف نقاط a و b از رابطه‌ی (۳) در رابطه‌ی (۲)، هر عامل فیزیکی به صورت یک متغیر تصادفی که بر حسب میانگین و ضریب تغییرات آن تعریف می‌شود، بیان می‌شود (Pinto et al., 2006):

$$X = \mu(\alpha\sqrt{3}(2W(0,1) - 1) + 1) \quad (\text{رابطه ۴})$$

در ادامه به ترتیب، مشخصات معادلات تجربی انتقال رسوب مورد نظر در این تحقیق، دامنه و مقادیر معرف خصوصیات فیزیکی مورد بررسی، تعداد محاسبات آماری مورد نیاز، و سپس شاخص‌های کمی برای مقایسه و ارزیابی معادلات ارائه شده است. بار کل رسوب عبارت است از حاصل جمع بار بستر^۵ و بار معلق^۶ و یا حاصل جمع بار مواد بستر^۷ و بار شسته^۸، در شرایطی که رسوبات رودخانه کم است. در رودخانه‌های کم عمق، کل بار رسوب تقریباً برابر با بار بستر خواهد بود. بر عکس در رودخانه‌های عمیق، بار بستر فقط بین ۳ تا ۲۰ درصد بار کل رسوب را تشکیل

9. Energy exchange

10. Specific weight

11. Sediment mean grain size

12. Specific density

13. Bed shear stress

14. Statistical - Probabilistic concepts

15. Regression equation

1. Probability density functions

2. Uniform probability distribution

3. Variation Coefficient

4. Standard deviation

5. Bed load

6. Suspended load

7. Bed material

8. Wash load

$$\Psi_s = \frac{\bar{u}^3}{(G_s - 1) g d \omega_s} \left[\log \left(\frac{d}{d_{50}} \right) \right]^{-2} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

تمام اجزای این رابطه در بخش‌های قبل معرفی شده‌اند.

(د) معادله Yang and Lim (2003)

Yang and Lim با استفاده از آنالیز ابعادی، معادله‌ای را برای برآورد انتقال بار کل ارائه دادند که بار شسته را نیز شامل می‌شود (Dey, 2014):

$$g_t = k \frac{G_s \tau_0}{(G_s - 1) \omega_s} \cdot (u_*'^2 - u_{*c}^2) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

در رابطه‌ی بالا، g_t نرخ انتقال بار کل (بر حسب وزن در واحد زمان)، k ضریب تجربی ($= 12/5$)، u_*' سرعت برشی ناشی از زیری ذره، و u_{*c} سرعت برشی آستانه حرکت^۷ است. سایر اجزای رابطه در توضیحات معادلات قبلی، تعریف شده‌اند. پس از محاسبه g_t ، با رابطه‌ی $q_t = g_t / \gamma_s$ دبی بار کل رسوب در واحد عرض جریان (بر حسب m^2/s) به دست می‌آید.

خصوصیات فیزیکی ورودی که برای آنالیز خطا انتخاب شده‌اند، عبارتند از: سرعت متوسط عمقی جریان (u)، عمق جریان (d)، قطر میانه‌ی ذرات رسوب (d_{50})، و ضریب مانینگ (n). چگالی آب (ρ) و چگالی رسوب (ρ_s) نیز متغیرهایی هستند که ممکن است منبع بروز خطا در محاسبات انتقال رسوب باشند، ولی در حساسیت‌سنجی معادلات انتقال رسوب، جزء خصوصیات فیزیکی مورد بررسی نیستند، چون چگالی رسوب مقداری مشخص است و بررسی‌ها نشان می‌دهد که انتقال رسوب حساسیت چندانی به تغییرات معمول چگالی آب ندارد (Pinto et al., 2006). بنابراین در این تحقیق در تمام محاسبات، برای چگالی آب و رسوب، به ترتیب مقادیر ثابت $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ و $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ (ذرات کوارتز) در نظر گرفته شد.

جدول ۱- دامنه‌ی مقادیر تیپ و مقدار مرجع مربوط به خصوصیات فیزیکی ورودی

| مقدار مرجع | مقادیر تیپ | مشخصه فیزیکی |
|------------|---------------------------|-----------------------------|
| ... | ۰/۵، ۱، ۱۰، ۲۰ | d (m) |
| ۱ | ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۲ | u ($\frac{m}{s}$) |
| ۰/۶ | ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱ | d_{50} (mm) |
| ۰/۰۲ | ۰/۰۱۵، ۰/۰۱۷، ۰/۰۲، ۰/۰۲۲ | n ($\frac{s}{m^{1/3}}$) |

برای هر یک از خصوصیات فیزیکی، یک دامنه‌ی تغییرات معمول و نیز یک مقدار مرجع در نظر گرفته شده است (جدول

که در آن، C_t غلظت متوسط رسوب (بر حسب ppm) است، پارامتر Y نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Y = \left(\frac{\bar{u} S^{0.57}}{\omega_s^{0.32}} \right)^{0.007502} \quad (\text{رابطه ۷})$$

در رابطه‌ی بی‌بعد بالا، \bar{u} سرعت متوسط جریان (بر حسب m/s)، S شیب سطح آب، و ω_s سرعت سقوط ذرات رسوب (بر حسب m/s) است. برای محاسبه‌ی سرعت سقوط ذرات رسوب، روابط تجربی مختلفی وجود دارد. در این تحقیق از رابطه‌ی زیر استفاده شده است (Dey, 2014):

$$\omega_s = \frac{P}{Q} \cdot \frac{v}{d_n} \left[\sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{4Q}{3P^2} D_*^3 \right)^{\frac{1}{m}}} - \frac{1}{2} \right]^m \quad (\text{رابطه ۸})$$

در رابطه‌ی بالا، v لزجت سینماتیک آب (بر حسب m^2/s) است که در اینجا مقدار مربوط به آب $20^\circ C$ و در فشار اتمسفر استاندارد (1 atm) در نظر گرفته شده است، d_n قطر اسمی^۱ ذرات رسوب است که برابر با قطر میانه ذرات رسوب فرض شده است ($d_n = d_{50}$)، D_* عدد بی‌بعد ذره^۲، و Q ، P و m ضرایبی هستند که توسط Cheng (1997) برای رسوبات طبیعی با عامل شکل^۳ برابر $0.7/0.7 \approx S_p$ به ترتیب مساوی با 1 ، 32 و $1/5$ تعیین شده‌اند. ω_s نیز قبلاً تعریف شده است. پس از محاسبه‌ی غلظت رسوب با معادله‌ی (۶)، دبی در واحد عرض انتقال رسوب با رابطه‌ی $q_t = \gamma_w d \bar{u} (C_t \times 10^{-6})$ حساب می‌شود، که در آن، d عمق جریان (بر حسب m) است. سایر عوامل نیز قبلاً معرفی شده‌اند.

(ج) معادله Molinas and Wu (2001)

این محققان با استفاده‌ی تلفیقی از مفاهیم انرژی و قدرت جریان^۴، و نیز با استفاده از داده‌های مربوط به رودخانه‌های بزرگ با بستر ماسه‌ای (رودخانه‌هایی مانند آمازون، می‌سی‌سی‌پی، آرینوکو^۵ و ...) معادله‌ای تجربی برای تعیین غلظت متوسط بار رسوب کل ارائه دادند (Dey, 2014). معادله‌ی پیشنهادی آن‌ها به صورت زیر است:

$$\bar{c}_{pt} = \frac{1430(0.86 + \Psi_s^{0.5})\Psi_s^{1.5}}{0.016 + \Psi_s} \quad (\text{رابطه ۹})$$

در این معادله که بار شسته نیز لحاظ شده است، \bar{c}_{pt} غلظت بار رسوبی کل (بر حسب ppm) و Ψ_s قدرت جریان بی‌بعد^۶ نامیده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

5. Orinoco river

6. Non-dimensional stream power

7. Threshold shear velocity

1. Nominal diameter

2. Non-dimensional particle parameter

3. Shape Factor

4. Stream power

چولگی مثبت، دُم منحنی توزیع احتمال به سمت راست کشیده می‌شود که اصطلاحاً به آن چوله به راست می‌گویند. بالعکس در چولگی منفی، دُم سمت چپ طولانی‌تر از سمت راست است که این حالت را چوله به چپ می‌نامند. در این تحقیق، چولگی معیاری است که نشان می‌دهد آیا برآوردهای دست‌بالای یک خصوصیت فیزیکی، در اندازه‌گیری‌ها، موجب کاهش خطای محاسبات انتقال رسوب می‌شود یا برآوردهای دست‌پایین آن. بر این مبنا، اگر چولگی مثبت باشد، یعنی به منظور کاهش خطا، بهتر است از مقادیر دست‌پایین عامل فیزیکی مورد نظر به جای مقادیر دست‌بالای آن استفاده شود. برعکس، چنانچه چولگی منفی باشد، مقادیر دست‌بالا در اندازه‌گیری‌های آن خصوصیت فیزیکی، به جای مقادیر دست‌پایین، موجب کاهش خطا خواهند شد.

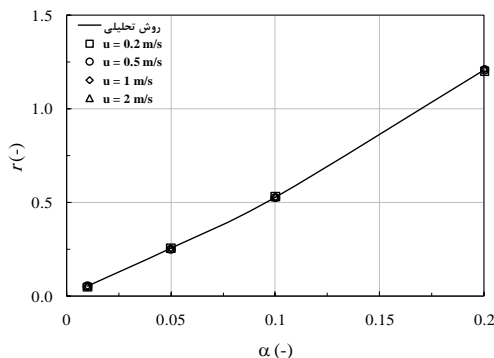
نتایج و بحث

به دلیل سادگی معادله‌ی EH، از این معادله در روش تحلیلی و همچنین برای صحت‌سنجی روش عددی مونت کارلو استفاده شده است. از بین خصوصیات فیزیکی مورد بررسی (جدول ۱)، سرعت جریان برای انجام صحت‌سنجی انتخاب شده است. می‌توان نشان داد که در معادله‌ی EH، شاخص r مستقل از همه‌ی خصوصیات فیزیکی، به‌جز سرعت، است و به‌صورت زیر بیان می‌شود (Pinto et al., 2006):

(رابطه ۱۴)

$$r = \frac{2}{b^2 - a^2} \left[\frac{(b^{11} - a^{11})(b - a)}{11} - \frac{(b^6 - a^6)^2}{36} \right]^{0.5}$$

در شکل ۱، نتایج روش تحلیلی و روش عددی برای معادله‌ی EH نشان داده شده است. مطابق با شکل ۱، نتایج روش تحلیلی و روش عددی به‌خوبی با یکدیگر همخوانی دارند. مقایسه‌ی نتایج این دو روش، نشان دهنده‌ی درستی روش مونت کارلو برای حساسیت‌سنجی سایر معادلات انتقال رسوب است.



شکل ۱- حساسیت‌سنجی معادله EH نسبت به تغییرات سرعت. منحنی، خروجی روش تحلیلی و علائم، خروجی روش عددی مونت کارلو را نشان می‌دهند.

۱). مقادیر مرجع خصوصیات فیزیکی زمانی استفاده می‌شوند که آن خصوصیات در طول محاسبات عددی، ثابت نگه داشته می‌شوند.

در این تحقیق، تأثیر وجود خطا در هر یک از خصوصیات فیزیکی به‌طور مجزا ارزیابی شده است. به این ترتیب که در هر شبیه‌سازی، سه خصوصیات فیزیکی در مقادیر مرجع خود ثابت نگه داشته می‌شوند و تغییرات خصوصیت دیگر که دارای توزیعی یکنواخت است بررسی می‌شود.

ضریب تغییرات α برای خصوصیات فیزیکی مختلف، متفاوت است. برای u ، d ، و n ضریب α بین ۰/۱ تا ۰/۲ تغییر می‌کند. در مورد u و d دامنه‌ی α بر پایه‌ی خطاهای طبیعی و معمول این دو مشخصه در شرایط واقعی است. برای مثال، با بررسی داده‌های سرعت، مشخص می‌شود که خطایی در حدود ۲۰ درصد (یعنی $\alpha = ۰/۲$) در سرعت معمول است (Fortunato et al., 2002). در خصوص عمق جریان، در عمق‌های بیشتر از ۶ متر، بین ۰/۱ متر تا ۰/۱۵ متر و در عمق‌های کمتر از ۶ متر می‌تواند بیش از ۰/۲۵ متر باشد (Van Rijn et al., 2000). در خصوص سایر خصوصیات نیز، دامنه‌ی α بر مبنای دامنه‌ی تغییرات معمول این عوامل در شرایط واقعی تعیین می‌شود.

برای تحلیل نتایج محاسبات، چهار کمیت خروجی در نظر گرفته شده است: ۱- انتقال رسوبی که بر مبنای مقادیر متوسط عوامل فیزیکی ورودی محاسبه می‌شود (q_{mp})، ۲- انتقال رسوب در هر بار شبیه‌سازی با روش مونت کارلو ($q_i = q(u_i, d_i, \bar{d}_{50i}, n_i)$; $i = 1, \dots, N$). تعداد محاسبات در هر شبیه‌سازی برابر با ۱۰۰۰۰ ($N = 10000$) می‌باشد. ۳- میانگین انتقال رسوب محاسبه شده در هر بار شبیه‌سازی ($q_m = \bar{q}_i$)، و ۴- انحراف از معیار استاندارد انتقال رسوب (σ_q).

آنالیز خطا با استفاده از شاخص r که به‌صورت نسبت بین کمیت‌های چهارم و اول تعریف می‌شود، صورت می‌گیرد:

$$r = \frac{\sigma_q}{q_{mp}} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

چنانچه مقادیر r کمتر از ۱ باشند، قابل قبول، مقادیر بین ۱ تا ۱۰ زیاد، و مقادیر بزرگتر از ۱۰ غیرقابل قبول تلقی می‌شوند. چولگی^۱ (s) نیز به‌عنوان معیار عدم تقارن استفاده می‌شود:

$$s = \frac{\sum_{i=1}^N (q_i - q_m)^3}{(N - 1) \sigma_q^3} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

چولگی بیانگر میزان عدم تقارن توزیع احتمال داده‌ها حول میانگین‌شان است. چولگی می‌تواند مثبت یا منفی باشد. در

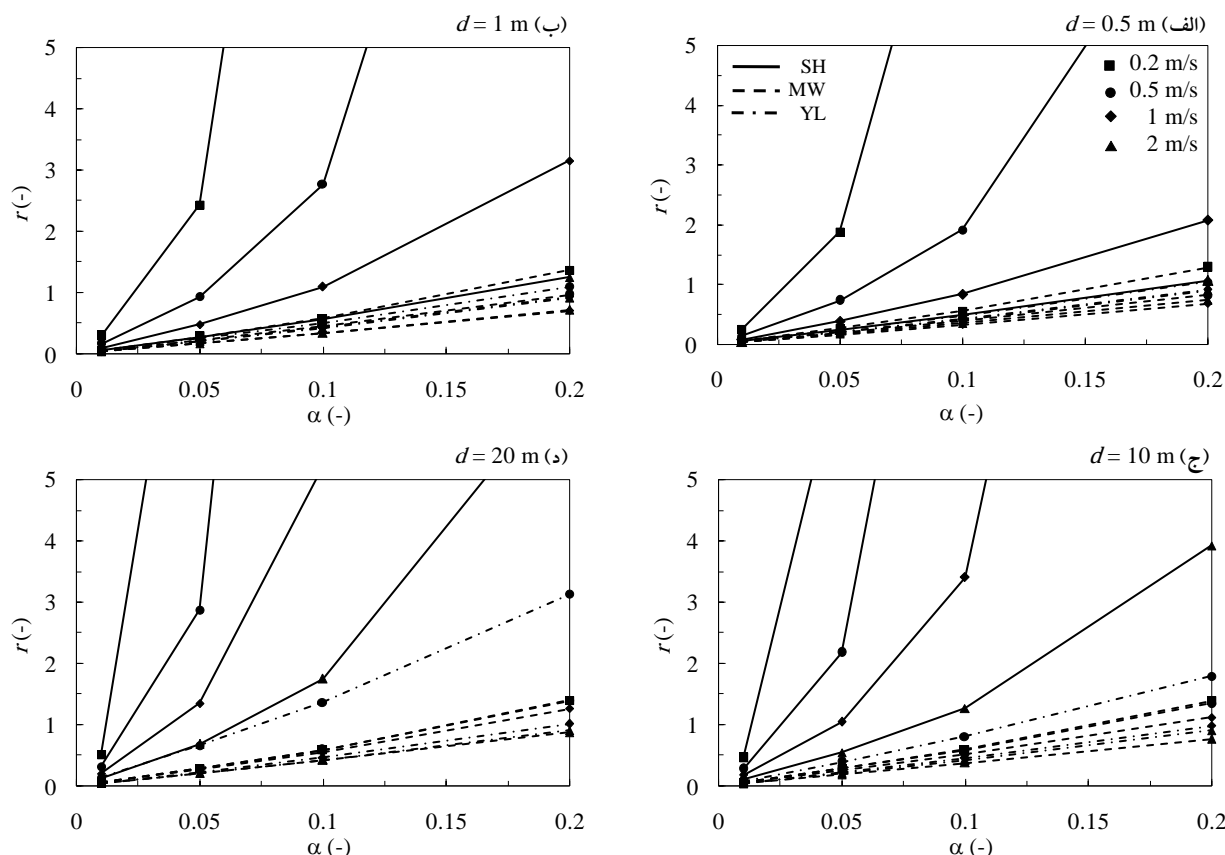
خود متغیر مورد بررسی است، محاسبات حساسیت‌سنجی به ازای مشخصه‌ی دیگر جریان، یعنی سرعت (u) انجام می‌شود.

حساسیت‌سنجی نسبت به سرعت جریان:

در ادامه، ابتدا خطای ناشی از اندازه‌گیری‌های سرعت جریان بر انتقال رسوب بررسی شده است. این بررسی در بخش قبل به طور مجزا برای معادله‌ی EH انجام شد. بنابراین در ادامه برای سه رابطه‌ی دیگر انتقال بار کل رسوب: معادله‌های SH، MW، و YL، ارائه شده است.

تحلیل‌های عددی با استفاده از روش مونت کارلو

در این بخش معادلات تجربی برآورد بار کل رسوب نسبت به خطای موجود در مشخصه‌های فیزیکی ورودی، به‌طور جداگانه حساسیت‌سنجی شده‌اند. به این ترتیب که هر بار یکی از مشخصه‌ها متغیر فرض شده، در حالی که سایر متغیرها در مقادیر معرف خود (طبق جدول ۱) ثابت باقی می‌مانند. در تمام شبیه‌سازی‌ها، عوامل ورودی معادلات، به جزء عمق جریان (d)، یکی یکی بررسی می‌شود و شاخص‌های خطا در عمق‌های مختلف جریان برای آن‌ها ارزیابی می‌شود. در مرحله‌ای که عمق جریان،



شکل ۲- حساسیت معادله‌های SH، MW، و YL نسبت به تغییرات سرعت، به ازای: (الف) $d = 0.5$ m (ب) $d = 1$ m (ج) $d = 10$ m (د) $d = 20$ m

عمق‌های زیاد، رابطه‌ی SH در محاسبه‌ی انتقال رسوب محدودیت داشته و نتایج خوبی را ارائه نمی‌دهد.

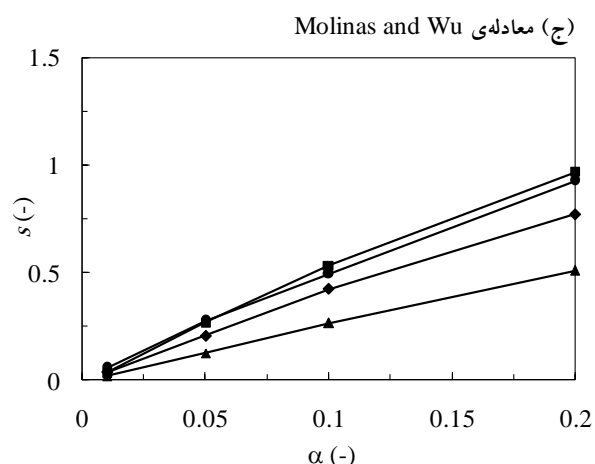
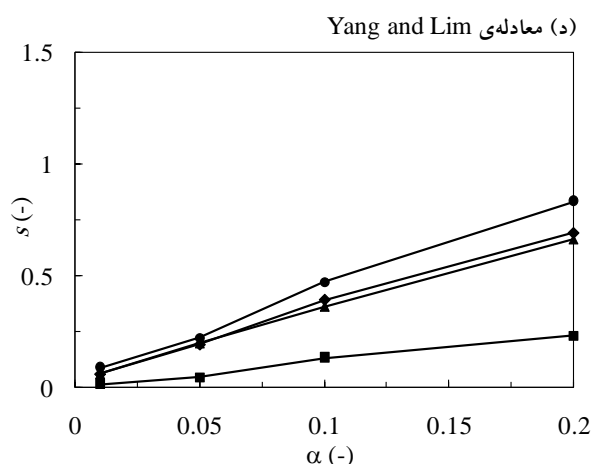
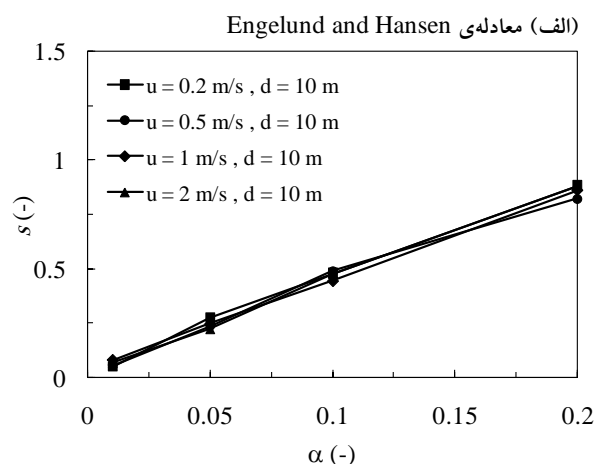
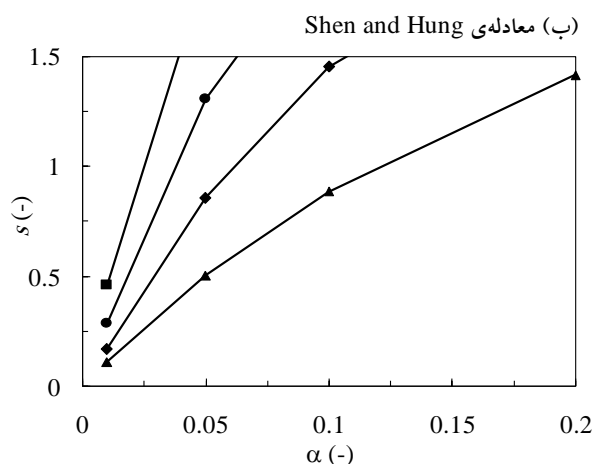
با توجه به شکل ۲، معادله‌ی MW نسبت به دو معادله‌ی دیگر، حساسیت کمتری را به خطای موجود در داده‌های سرعت نشان می‌دهد و مشخص است که به ازای تمام سرعت‌ها و عمق‌های مورد بررسی، مقادیر r قابل قبول هستند.

برای معادله‌ی YL، به ازای $\bar{u} = 0.2$ m/s در تمام عمق‌های جریان مورد بررسی، مقادیر غیرقابل قبول r به دست آمد، این مسئله به این دلیل است که در این سرعت، رسوبات به آستانه‌ی حرکت نمی‌رسند، به عبارت دیگر در این شرایط، تنش برشی

طبق شکل ۲، از بین سه معادله‌ی SH، MW، و YL، معادله‌ی SH بیشترین حساسیت را نسبت به خطاهای موجود در اندازه‌گیری‌های سرعت دارد. در معادله‌ی SH، در سرعت‌های پایین مقادیر r بسیار بزرگ و غیرقابل قبول هستند، ولی با افزایش سرعت جریان، مقادیر r بهبود می‌یابند، به گونه‌ای که در سرعت $\bar{u} = 2$ m/s در عمق‌های $d = 1$ m و $d = 0.5$ m مقادیر r به ازای تمام ضرایب خطای مورد بررسی ($\alpha \leq 0.2$) قابل قبول هستند ولی با افزایش عمق جریان به $d = 10$ m مقادیر r در محدوده‌ی $\alpha \leq 0.1$ (شکل ۲ ج) و در عمق $d = 20$ m فقط تا $\alpha \leq 0.05$ (شکل ۲ د) قابل قبول هستند. بنابراین در سرعت‌های پایین و در

رسم شده است. نمودارهای این شکل نشان می‌دهند که در تمام حالات، مقادیر چولگی مثبت هستند. این بدان معنی است که بیش‌برآورد مقادیر سرعت، در مقایسه با مقادیر دست‌پایین آن، سبب بروز خطای بیشتری در محاسبه‌ی انتقال رسوب می‌شود. در سایر عمق‌های جریان نیز نتیجه‌ی مشابهی به‌دست آمد (نمودارهای مربوطه نشان داده نشده‌اند).

کمتراز تنش برشی بحرانی است. برای این معادله، مقادیر غیرقابل قبول r همچنین در $(\bar{u}, d) = (0.5, 20)$ و $\alpha \geq 0.1$ مشاهده می‌شود (شکل ۲ د). در سایر حالات، مقادیر r قابل قبول هستند. در شکل ۳ چولگی چهار معادله‌ی انتقال بار کل رسوب، معادلات EH، SH، MW، و YL برای مقادیر مختلف سرعت و عمق جریان $d = 10$ m، به ازای مقادیر ضریب تغییرات $\alpha \leq 0.2$



شکل ۳- مقادیر چولگی برای تغییرات سرعت جریان در عمق $d = 10$ m (الف) معادله‌ی EH، (ب) معادله‌ی SH، (ج) معادله‌ی MW، و (د) معادله‌ی YL.

افزایش می‌گذارد، یعنی در عمق‌های زیاد، معادله‌ی SH حساسیت بیشتری به اندازه‌ی ذرات رسوب دارد. با توجه به این دو شکل (۴ ج و د) در عمق‌های زیاد بهتر است خطای اندازه‌گیری قطر رسوبات از ۲۰ درصد ($\alpha = 0.2$) بیشتر نباشد.

در معادله‌ی MW نیز یک روند کلی مشاهده می‌شود: به این ترتیب که مستقل از عمق جریان، با کاهش اندازه‌ی ذرات رسوب، مقدار r افزایش می‌یابد، یعنی معادله‌ی MW حساسیت بیشتری به اندازه‌ی رسوبات ریزدانه دارد. همچنین با افزایش عمق جریان، به تدریج مقدار r افزایش می‌یابد. با این وجود، در هر چهار عمق جریان مورد بررسی، مقادیر r در دامنه‌ی قابل قبول قرار دارند، به جز در سه حالت شامل: $(0.4, 0.5, 20)$ ، $(0.4, 0.2, 0.4)$ ،

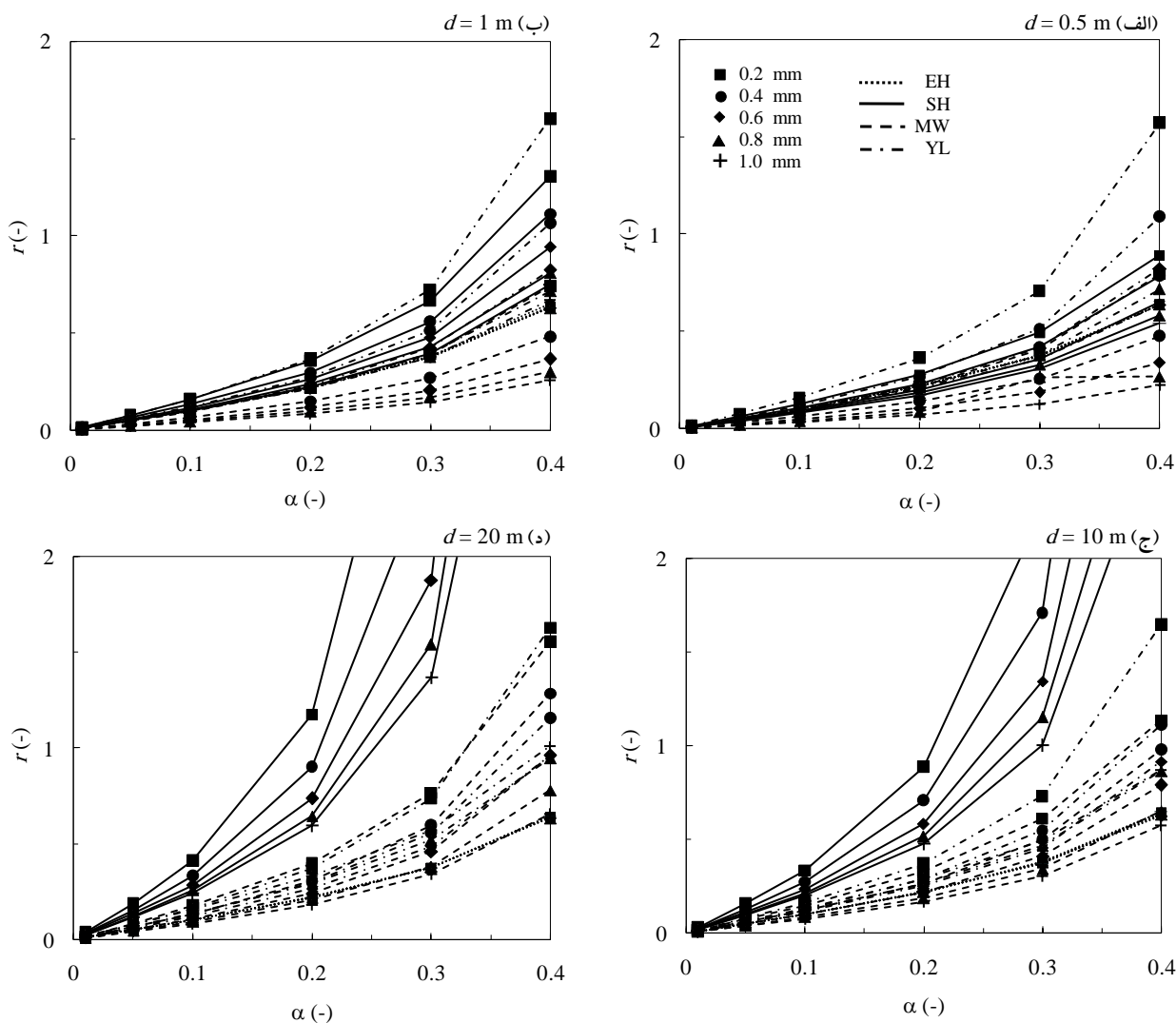
حساسیت‌سنجی نسبت به اندازه‌ی ذرات رسوب:

با توجه به شکل ۴، معادله‌ی EH در تمام عمق‌های جریان مورد بررسی، حساسیت زیادی به خطای موجود در اندازه‌ی ذرات رسوب نشان نمی‌دهد.

در معادله‌ی SH، مستقل از عمق جریان، با افزایش اندازه‌ی ذرات رسوب، مقدار r کاهش می‌یابد (شکل ۴)، یعنی این معادله در اندازه‌های بزرگتر، حساسیت کمتری به اندازه‌ی ذرات دارد. در عمق ۰/۵ متر، به ازای تمام اندازه‌های مورد بررسی، مقادیر r قابل قبول هستند (شکل ۴ الف). در عمق ۱ متر، به ازای 0.2 mm = d_{50} و $\alpha = 0.4$ مقدار r بیشتر از ۱ شده است (شکل ۴ ب). در شکل‌های (۴ ج) و (۴ د) با افزایش عمق جریان، مقدار r رو به

ازای $d_{50} = 0.2$ mm و $\alpha = 0.4$ مقادیر r بزرگتر از ۱ هستند. از بین چهار معادله‌ی مورد بررسی، معادله‌ی MW کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات اندازه‌ی رسوبات نشان می‌دهد (شکل ۴). از طرفی در عمق‌های $d \leq 1$ m (شکل‌های الف و ب)، معادله‌ی YL، و در عمق‌های $d \geq 10$ m (شکل‌های ج و د)، معادله‌ی SH بیشترین حساسیت را نسبت به خطای موجود در اندازه‌ی ذرات رسوب نشان می‌دهند.

(۲۰)، $(d, d_{50}, \alpha) = (10, 0.2, 0.4)$ شکل‌های (ج ۴) و (د ۴) که این سه حالت مربوط به عمق‌های زیاد و ذرات کوچکتر است که در این شرایط ذرات به‌طور کامل به آستانه حرکت نمی‌رسند. بنابراین در صورت استفاده از معادله‌ی MW بهتر است خطای اندازه‌ی ذرات رسوب از ۳۰ درصد ($\alpha = 0.3$) بیشتر نباشد. در معادله‌ی YL نیز مستقل از عمق جریان، با کاهش اندازه‌ی ذرات، مقدار r افزایش یافته است. در هر چهار عمق مورد بررسی، به



شکل ۴- حساسیت معادلات EH, SH, MW, و YL نسبت به تغییرات اندازه‌ی ذرات رسوب، به ازای: (الف) $d = 0.5$ m (ب) $d = 1$ m (ج) $d = 10$ m و (د) $d = 20$ m

منجر به خطای بیشتری در محاسبه‌ی انتقال رسوب می‌شود.

حساسیت‌سنجی نسبت به عمق جریان:

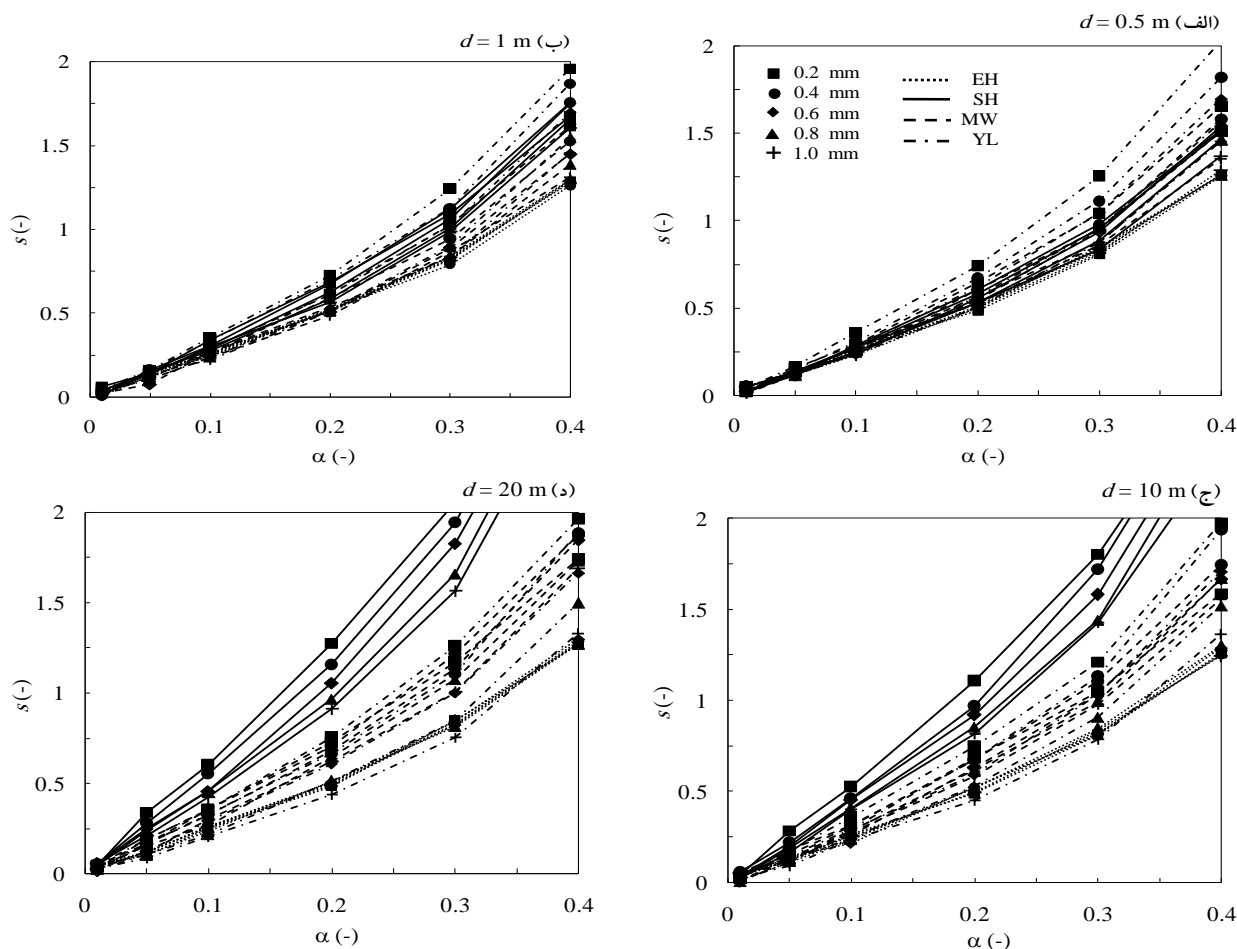
حساسیت‌سنجی معادلات انتقال رسوب نسبت به تغییرات عمق جریان، به ازای مقادیر مختلف سرعت جریان انجام شده است. با توجه به شکل ۶، در تمام نمودارهای مربوط به معادله‌ی EH مقدار r بیشتر از ۰/۱۱ نبوده است و کاملاً در محدوده‌ی قابل قبول قرار

در شکل ۵ چولگی چهار معادله‌ی انتقال بار کل رسوب (EH, SH, MW, و YL) برای مقادیر مختلف اندازه‌ی رسوبات در چهار عمق جریان، به ازای مقادیر ضریب تغییرات $\alpha \leq 0.4$ رسم شده است. نمودارهای این شکل نشان می‌دهند که در تمام حالات، مقادیر چولگی مثبت هستند. بنابراین در اینجا نیز مقادیر دست‌بالای اندازه‌ی ذرات، در مقایسه با مقادیر دست‌پایین آن،

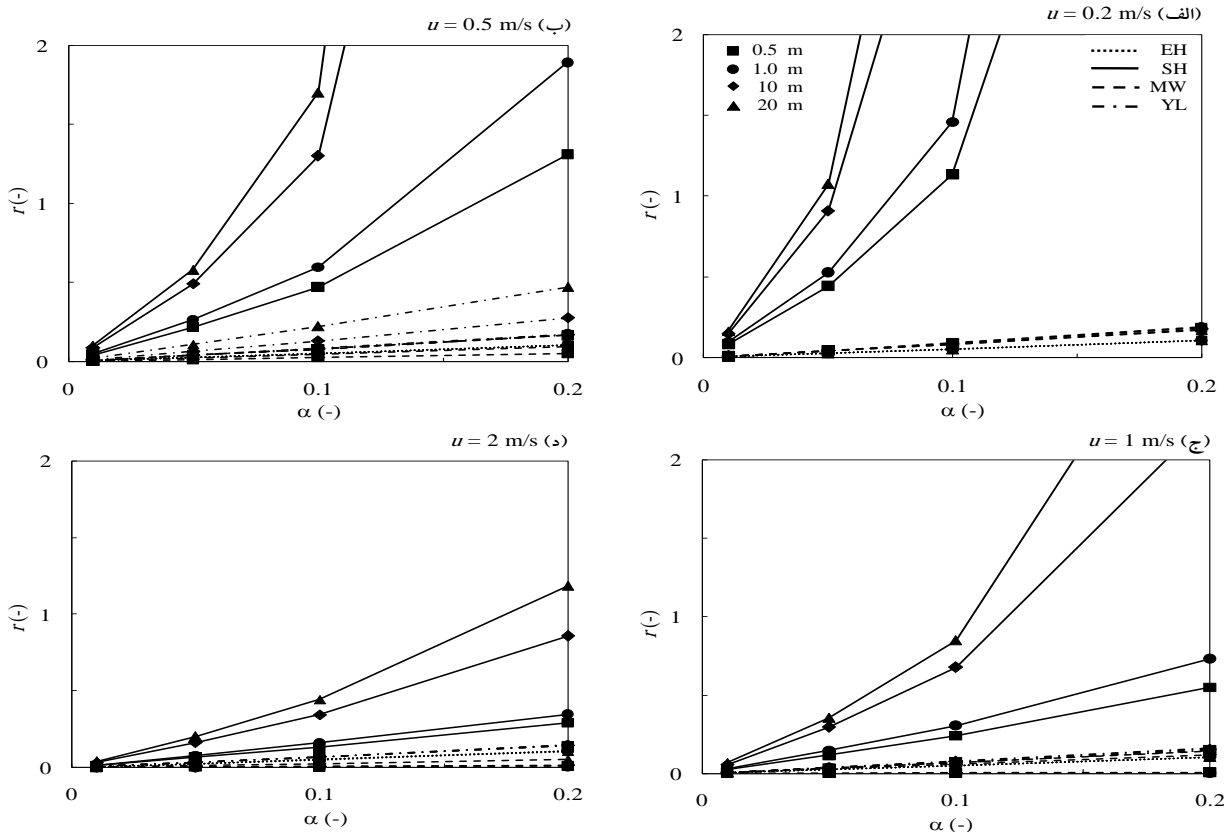
دارند. بر این اساس، معادله‌ی EH نسبت به خطاهای مربوط به عمق جریان نیز حساسیت کمی دارد و خطاهای معمول در اندازه‌گیری عمق جریان، تأثیر زیادی را در برآورد انتقال رسوب با استفاده از این معادله ایجاد نمی‌کند. برای معادله‌ی SH مشاهده می‌شود که به ازای هر یک از مقادیر سرعت، با افزایش عمق جریان، مقدار r افزایش یافته است. از طرفی با افزایش سرعت جریان، مقادیر r در تمام عمق‌ها کاهش می‌یابد (شکل ۶ الف تا ۶ د)، به گونه‌ای که در سرعت $u = 2 \text{ m/s}$ فقط در عمق $d = 20 \text{ m}$ به ازای $\alpha = 0.2$ مقدار r بزرگتر از ۱ است (شکل ۶ د). بنابراین می‌توان گفت که معادله‌ی SH نسبت به خطاهای عمق جریان نیز حساسیت زیادی دارد و این حساسیت در سرعت‌های پایین شدیدتر است. در معادله‌ی MW نیز در تمام حالات مورد بررسی مقادیر r کمتر از ۱ و قابل قبول هستند. در سرعت $u = 0.2 \text{ m/s}$ و عمق‌های 10 m و 20 m مقادیر r از 0.18 تجاوز نمی‌کنند (شکل ۶ الف) و در سرعت‌های بالاتر $u = 1 \text{ m/s}$ و $u = 2 \text{ m/s}$ مقادیر r بسیار کمتر، به ازای بیشتر مقادیر α ، کمتر از 0.1 هستند (شکل‌های ۶ ج و ۶ د). در معادله‌ی YL به ازای $u = 2 \text{ m/s}$ در تمام عمق‌های جریان، مقادیر منفی برای r به دست آمد که این مسئله به دلیل کمتر بودن سرعت برشی جریان نسبت به سرعت برشی بحرانی است.

در نمودارهای چولگی مربوط به تغییرات عمق جریان، در تمام سرعت‌های مورد بررسی، چولگی معادله‌ی EH مثبت به دست آمد (شکل ۷). نمودارهای چولگی مربوط به معادله‌ی SH نشان می‌دهند که اگر عمق جریان با درصد خطای بالا بیش‌برآورد شوند، موجب می‌شود تا برآورد انتقال رسوب بسیار بیشتر از مقادیر واقعی باشد. بنابراین بهتر است در صورت استفاده از معادله‌ی SH از مقادیر دست‌پایین به جای مقادیر دست‌بالای عمق جریان استفاده شود. در معادله‌ی MW در سرعت‌های 0.2 m/s و 0.5 m/s مقدار چولگی مثبت (شکل ۷ الف و ۷ ب) و در شکل‌های (۷ ج) و (۷ د) در حالات $(1, 0.5)$ ، $(2, 10)$ ، چولگی معادله‌ی YL در دو حالت $(0.2, 20)$ ، $(0.2, 10)$ ، مقادیر چولگی منفی هستند. در نمودارهای (u, d) مقادیر چولگی منفی و در سایر حالات مثبت هستند.

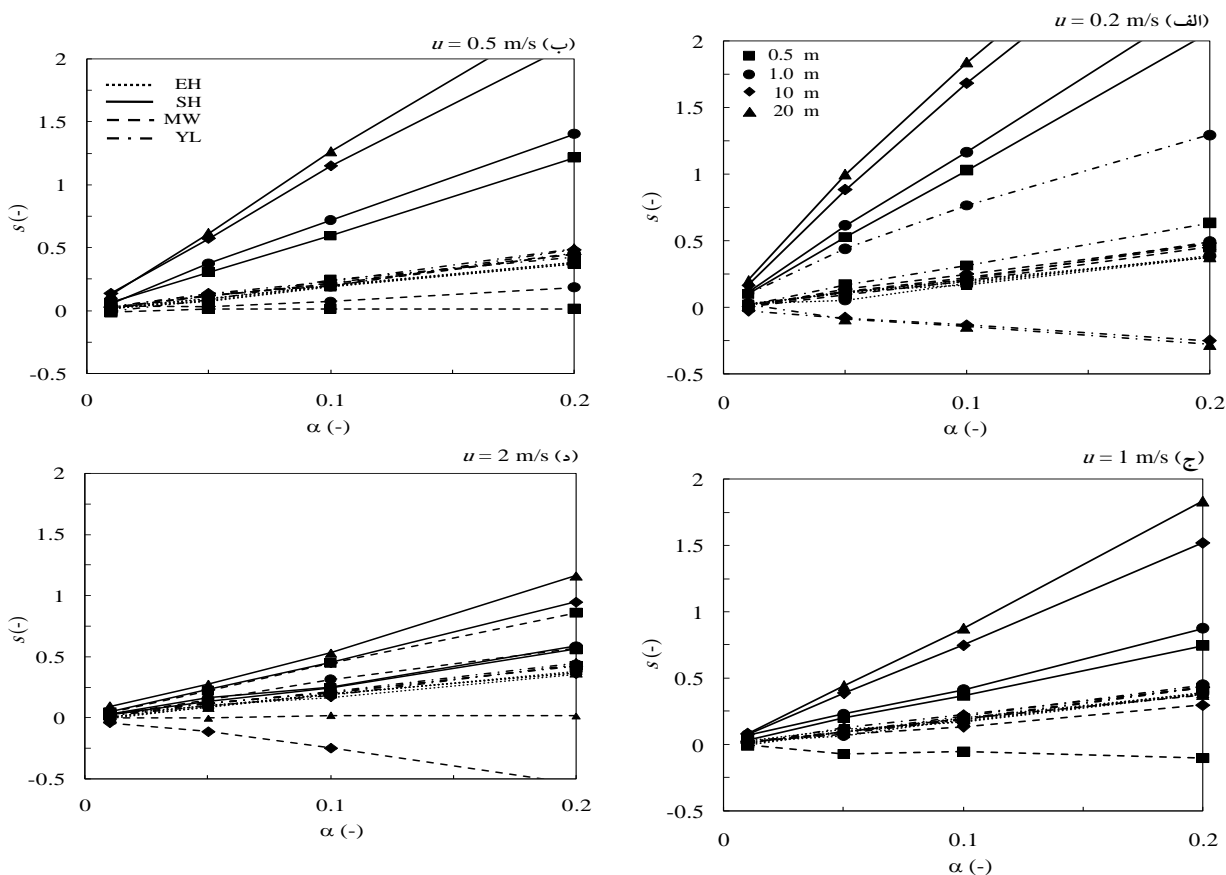
در این اساس، معادله‌ی EH نسبت به خطاهای مربوط به عمق جریان نیز حساسیت کمی دارد و خطاهای معمول در اندازه‌گیری عمق جریان، تأثیر زیادی را در برآورد انتقال رسوب با استفاده از این معادله ایجاد نمی‌کند. برای معادله‌ی SH مشاهده می‌شود که به ازای هر یک از مقادیر سرعت، با افزایش عمق جریان، مقدار r افزایش یافته است. از طرفی با افزایش سرعت جریان، مقادیر r در تمام عمق‌ها کاهش می‌یابد (شکل ۶ الف تا ۶ د)، به گونه‌ای که در سرعت $u = 2 \text{ m/s}$ فقط در عمق $d = 20 \text{ m}$ به ازای $\alpha = 0.2$ مقدار r بزرگتر از ۱ است (شکل ۶ د). بنابراین می‌توان گفت که معادله‌ی SH نسبت به خطاهای عمق جریان نیز حساسیت زیادی دارد و این حساسیت در سرعت‌های پایین شدیدتر است. در معادله‌ی MW نیز در تمام حالات مورد بررسی مقادیر r کمتر از ۱ و قابل قبول هستند. در سرعت $u = 0.2 \text{ m/s}$ و عمق‌های 10 m و 20 m مقادیر r از 0.18 تجاوز نمی‌کنند (شکل ۶ الف) و در سرعت‌های بالاتر $u = 1 \text{ m/s}$ و $u = 2 \text{ m/s}$ مقادیر r بسیار کمتر، به ازای بیشتر مقادیر α ، کمتر از 0.1 هستند (شکل‌های ۶ ج و ۶ د). در معادله‌ی YL به ازای $u = 2 \text{ m/s}$ در تمام عمق‌های جریان، مقادیر منفی برای r به دست آمد که این مسئله به دلیل کمتر بودن سرعت برشی جریان نسبت به سرعت برشی بحرانی است.



شکل ۵- مقادیر چولگی مربوط به تغییرات اندازه‌ی ذرات رسوب برای معادلات EH، SH، MW، و YL، به ازای: (الف) $d = 0.5 \text{ m}$ (ب) $d = 1 \text{ m}$ (ج) $d = 10 \text{ m}$ (د) $d = 20 \text{ m}$



شکل ۶- حساسیت معادلات EH, SH, MW, و YL نسبت به تغییرات عمق جریان، به ازای: (الف) $u = 0.2 \text{ m/s}$ (ب) $u = 0.5 \text{ m/s}$ (ج) $u = 1 \text{ m/s}$ و $u = 2 \text{ m/s}$ (د)

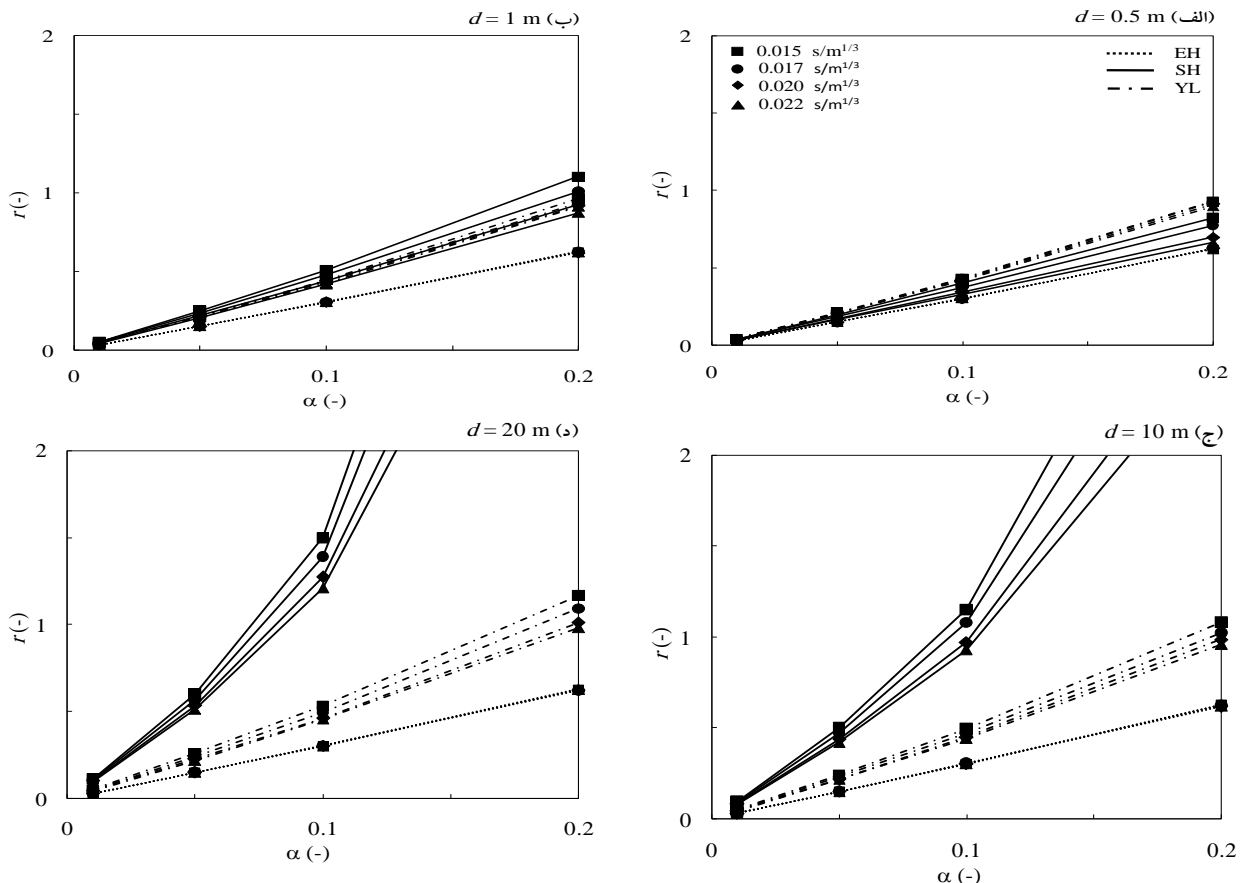


شکل ۷- مقادیر چولگی مربوط به تغییرات عمق جریان برای معادلات EH, SH, MW, و YL، به ازای: (الف) $u = 0.2 \text{ m/s}$ (ب) $u = 0.5 \text{ m/s}$ (ج) $u = 1 \text{ m/s}$ و $u = 2 \text{ m/s}$ (د)

حساسیت‌سنجی نسبت به ضریب زبری:

خطای برآورد ضریب زبری از ۵ تا ۱۰ درصد بیشتر نباشد. حساسیت معادله‌ی YL نسبت به تغییرات n در عمق $d = 0.5$ m در مقایسه با معادلات EH و SH بیشتر است (شکل ۸ الف)، ولی در عمق‌های بزرگتر مورد بررسی، معادله‌ی YL حساسیتی بیشتر از معادله‌ی EH و کمتر از معادله‌ی SH را نشان می‌دهد. در معادله‌ی YL ضمن اینکه با افزایش عمق جریان مقادیر r به تدریج افزایش می‌یابد، در تمام عمق‌های مورد بررسی عمدتاً مقادیر r قابل قبول هستند به جز در عمق‌های $d = 10$ m و $d = 20$ m و $\alpha = 0.2$ ، که به ازای $n = 0.15$ و $n = 0.17$ مقادیر بزرگتر از ۱ برای r حاصل شده است. همچنین شکل ۸ نشان می‌دهد که برای معادلات SH و YL، صرف‌نظر از عمق مورد بررسی، در تمام حالات با افزایش ضریب زبری n مقدار r کاهش یافته است (از آنجایی که معادله‌ی MW به متغیر n وابسته نیست، در این بخش مورد بررسی قرار نگرفته است).

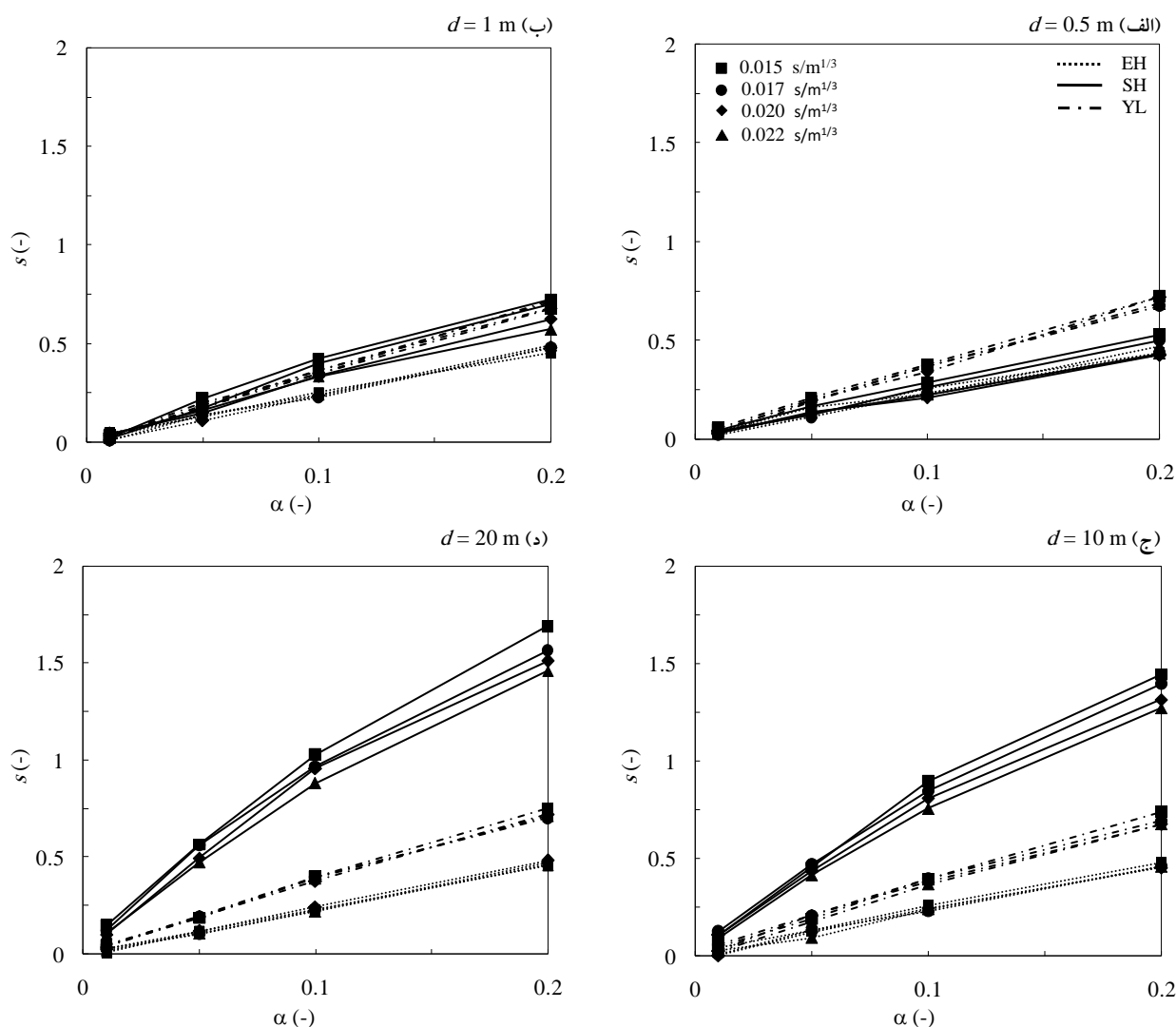
در حساسیت‌سنجی معادلات انتقال رسوب نسبت به خطاهای موجود در ضریب زبری مانینگ، برای معادله‌ی EH در تمام عمق‌های جریان مورد بررسی مقادیر r یکسان و در محدوده‌ی قابل قبول حاصل شد به‌گونه‌ای که در هیچ‌یک از حالات مورد بررسی مقدار r بیشتر از ۰/۶۳ نبود (شکل ۸)، که نشان می‌دهد این معادله حساسیت زیادی نسبت به مقدار ضریب زبری ندارد. حساسیت معادله‌ی SH در مقایسه با معادله‌ی EH نسبت به تغییرات ضریب زبری بیشتر است. در عمق‌های $d = 0.5$ m و $d = 1$ m مقادیر r برای این معادله عمدتاً در محدوده‌ی قابل قبول قرار دارند (شکل‌های ۸ الف، و ب) ولی در عمق‌های $d = 10$ m و $d = 20$ m مقادیر r به بزرگتر از ۱ میل می‌کنند (شکل‌های ۸ ج و ۸ د)، یعنی حساسیت معادله‌ی SH نسبت به تغییرات n با افزایش عمق جریان افزایش می‌یابد و بهتر است در عمق‌های زیاد،



شکل ۸- حساسیت معادلات EH، SH، و YL نسبت به تغییرات ضریب مانینگ، به ازای: (الف) $d = 0.5$ m (ب) $d = 1$ m (ج) $d = 10$ m و (د) $d = 20$ m

انتقال رسوب نسبت به مقدار واقعی آن بیشتر محاسبه شود و به منظور کاهش خطا، استفاده از مقادیر دست‌پایین n به جای مقادیر دست بالای آن ارجح است.

در شکل ۹ نیز چولگی سه معادله‌ی EH، SH، و YL برای تغییرات ضریب زبری n ارائه شده است. با توجه به این شکل، در تمام حالات مورد بررسی، مقادیر چولگی مثبت به دست آمده است که نشان می‌دهد مقادیر دست بالای n موجب می‌شوند تا



شکل ۹- حساسیت معادلات EH, SH, و YL نسبت به تغییرات ضریب مانینگ، به ازای: (الف) $d = 0.5$ m (ب) $d = 1$ m (ج) $d = 10$ m (د) $d = 20$ m

نتیجه‌گیری

عمق‌های زیاد بهتر است خطای سرعت جریان از ۵ درصد بیشتر نباشد. سه معادله‌ی دیگر نسبت به تغییرات سرعت، به‌جز در مواردی که خطا به حدود ۲۰ درصد می‌رسد، حساسیت کمتری را نشان دادند. در سرعت‌های پایین یا در عمق‌های زیاد و یا در ترکیبی از این شرایط، مقادیر غیرقابل قبولی از معادلات به‌دست می‌آید که این بدان علت است که ذرات رسوب به آستانه حرکت نمی‌رسند.

در بررسی تأثیر تغییرات اندازه‌ی ذرات رسوب، مشخص شد که در عمق‌های کم (0.5 m تا 1 m) حساسیت معادله‌ی YL بیشتر از سه معادله‌ی دیگر است، و بالعکس در عمق‌های زیاد (10 m و 20 m) معادله‌ی SH حساسیت بیشتری را نسبت به سایر معادلات نشان می‌دهد.

حساسیت‌سنجی معادلات انتقال رسوب نسبت به تغییرات عمق جریان، به‌ازای مقادیر مختلف سرعت جریان انجام شد. در این بررسی نیز مشخص شد معادله‌ی SH حساسیت بیشتری را

در این تحقیق میزان حساسیت چهار معادله‌ی تجربی محاسبه‌ی انتقال بار کل رسوب در رودخانه‌های با بستر ماسه‌ای، نسبت به خطای موجود در داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی مربوط به خصوصیات جریان و رسوب که متغیرهای معادلات تجربی مذکور هستند بررسی شده است. معادلات مورد بررسی شامل معادلات Engelund and Hansen (EH), Shen and Hung (SH), Molinas and Wu (MW), و Yang and Lim (YL) بودند. در این تحقیق انتشار خطای موجود در هر یک از خصوصیات فیزیکی ورودی و تأثیر آن بر محاسبات انتقال رسوب با چهار معادله‌ی مذکور به‌طور مجزا ارزیابی شد.

در بررسی میزان تأثیرپذیری معادلات نسبت به تغییرات سرعت مشخص شد که معادله‌ی SH بیشترین حساسیت را نسبت به سه معادله‌ی دیگر دارد و این حساسیت با افزایش عمق جریان افزایش می‌یابد، به‌گونه‌ای که در صورت استفاده از این معادله در

مقادیر بزرگی را نشان داد.

از چهار معادله‌ی مورد بررسی در این تحقیق معادله‌ی MW کمترین حساسیت و معادله‌ی SH بیشترین حساسیت را نسبت به خطاهای موجود در خصوصیات فیزیکی ورودی نشان دادند. ارزیابی معیار عدم تقارن چولگی نیز در تمام بخش‌ها نشان داد که عمدتاً بیش‌برآورد خصوصیات فیزیکی ورودی خطای بیشتری را در محاسبات انتقال رسوب با معادلات مورد بررسی در این تحقیق موجب می‌شود. بنابراین استفاده از مقایر دست‌پایین در داده‌های عوامل فیزیکی ورودی موجب کاهش خطا و حصول نتایج بهتری در برآورد انتقال رسوب می‌شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Bechteler, W., Maurer, M. (1990) Reliability theory applied to sediment transport formulae. 8th International Conference on Computational Methods in Surface Hydrology. Computational mechanics publications, Southampton, England, pp. 298-309.
- Camenen, B., Larroude, P. (2003) Comparison of sediment transport formulae for the coastal environment. *Coastal Engineering*, 48, pp. 111-132.
- Chang, C.H., Yang, J.C., Tung, Y.K. (1993) Sensitivity and Uncertainty analysis of a sediment transport model: a global approach. In: Cushman, J.H. (Ed.), *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, (vol. 7). Springer, Berlin, pp. 299-314.
- Cikojević, A., Gilja, G., and Kuspilić, N. (2019) Sensitivity analysis of empirical equations applicable on bridge piers in sand-bed rivers. 16th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering (WMHE). 100-108.
- Cimorelli, L., Covelli, C., De Vincenzo, A., and Pianese, D. (2021). Sedimentation in reservoirs: Evaluation of return periods related to operational failures of water supply reservoirs with Monte Carlo simulation. *Journal of water resources planning and management*, ASCE, 147(1).
- Depeweg, H., and Mendez V, N. (2007) A new approach to sediment transport in the design and operation of irrigation channels. Taylor and Francis Group, London, UK.
- Dey, S. (2014) *Fluvial hydrodynamics, Hydrodynamic and sediment transport phenomena*, Springer.
- Fernández, R., and Garcia, M.H. (2017) Input-variable sensitivity assessment for sediment transport relations. *Water resources research*, 53, pp. 8105-8119.
- Fortunato, A.B., Oliveira, A., Alves, E.T. (2002) Circulation and salinity intrusion in the Guadiana Estuary. *Thalassas* 18(2), pp. 43-65.
- Guertault, L., and Fox, G. A. (2018) Impact of data availability and resolution on long-term sedimentation estimates in a storage reservoir. *Journal of hydrologic engineering*, ASCE, 23(10).
- Gunawan, T.A., Daud, A., Haki, H., and Sarino (2019) The estimation of total sediment load in river tributary for sustainable resources management. IOP conference series: Earth and Environment science, 248.
- Hosseini, S.M., and Jahangiri, M. (2011) Uncertainty and sensitivity analysis of empirical equations for flow through rockfill. *Iranian journal of watershed management science and engineering*. 5(14), pp. 61-70.
- Hostache, R., Hissler, C., Matgen, P., Guignard, C., and Bates, P. (2014) Modeling suspended sediment propagation and related heavy metal contamination in floodplains: a parameter sensitivity analysis. *Hydrology and earth system sciences*, 18(9), pp. 3539-3551.
- Monowar Hossain, M., and Lutfor Rahman, M. (1998) Sediment transport functions and their evaluation using data from large alluvial rivers of Bangladesh. *Modelling Soil Erosion, Sediment Transport Closely Related Hydrological Processes* (Proceedings of a symposium held in Vienna, July 1998). IAHR Publ. No. 249.
- Nassar, M.A. (2011) Multi-parametric sensitivity analysis of CCHE2D for channel flow simulations in Nile river. *Journal of Hydro-environmental research*, 5(3), pp. 187-195.
- Pinto, L., Fortunato, A., and Freire, P. (2006) Sensitivity analysis of non-cohesive sediment transport formulae. *ScienceDirect, Continental shelf research*, 26, pp. 1826-1839.
- Shafie Bajestan, M. (2008) *Basic theory and practice of hydraulics of sediment transport* (2ed ed.). Shahid Chamran University press, Ahvaz. (in Farsi)
- Soulsby, R.L. (1995) The "Bailard" sediment transport formula: comparison with data and models, Adv. In coastal morphodynamics: an overview of the G8-coastal morphodynamics project, Delft Hydraulics, Netherlands.
- Van Rijn, L. C. (1984c) Sediment transport. Part III: bed forms and alluvial Roughness. *Journal of*

نسبت به سایر معادلات دارد ولی در عین حال با افزایش سرعت جریان از میزان حساسیت این معادله کاسته می‌شود. حساسیت سایر معادلات نسبت به تغییرات عمق جریان بسیار کم است به‌گونه‌ای که در تمام حالات مورد بررسی، مقدار r کمتر از ۰/۵ است.

در بررسی تغییرات ضریب زبری، معادله‌ی EH در تمام حالات رفتاری مشابه با کمترین حساسیت را نشان داد. معادله‌ی SH در عمق‌های کم حساسیت کمی نسبت به تغییرات n دارد، ولی با افزایش عمق جریان، تأثیرپذیری این معادله نیز افزایش می‌یابد. مقادیر r مربوط به معادله‌ی YL نیز در بیشتر حالات قابل قبول بود و فقط در عمق‌های زیاد و به ازای خطای ۲۰ درصد،

Hydraulic Engineering, ASCE, 110(12), pp. 1733-1754.

Van Rijn, L. C. (1989) *Handbook-sediment transport by currents and waves*. Report H 461, Delft Hydraulics.

Van Rijn, L. C., Grasmeijer, B.T., Ruessink, B.G.

(2000) Measurement errors of instruments for velocity, wave height, sand concentration and bed levels in field conditions. University of Utrecht, Delft Hydraulics Report.

Wu, W. (2008) *Computational river dynamics*, Taylor and Francis Group, London, UK.