

Numerical Investigation of the Relative Submergence Effects on the Logarithmic Velocity Profiles in a Straight Channel with Gravel Bed

HESAM FATHALI¹, MEYSAM FAZELI^{2*}, SEYED HOSSEIN MOHAJERI³, FOUAD KILANEHEI¹

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2. Department of Civil-Water Engineering, Civil Engineering, Architecture and Art Faculty, Science and Research Branch of Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3. Department of Civil Engineering, Faculty of Science and Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

(Received: Nov. 16, 2019- Revised: Feb. 4, 2020- Accepted: Feb. 9, 2020)

ABSTRACT

The study of turbulent flow field passing over the rough beds is still one of the important and controversial issues after a few years. In the past, most researchers have focused on flow with a high and medium relative submergence (the ratio of water depth to aggregate size), but only a few studies have been done on the low relative submergence flows. In this study, the gravel bed open-channel flow in a straight channel has been numerically modeled and studied using the Flow-3D package. The numerical model has been calibrated and verified using available data in the literature. During simulation, six different relative submergences were analyzed and the coefficients of Von Karman, integral constant and zero displacement planes determined. Results showed that in flat-bed conditions, the Von Karman coefficient is 0.41, but in the case of rough bed and relatively low submergence conditions, this value changes with relative submergence. These changes ranged from 0.29 to 0.43. It was also observed that with increasing depth, the Von Karman coefficient initially decreased and increased consecutively. Also, the zero displacement plane has no coherent relationship with relative submergence at all and it cannot be commented definitively. At the end, a new experimental formulation for the Von-Karman coefficient has been presented as a two-function equation with relative submergence boundary.

Keywords: Turbulent Flow, Relative Submergence, Gravel Bed, Numerical Modeling, Logarithmic Equation.

بررسی عددی اثر استغراق نسبی بر پارامترهای معادله لگاریتمی سرعت در یک کانال مستقیم با بستر شنی

حسام فتحعلی^۱، میثم فاضلی^{۲*}، سید حسین مهاجری^۳، فواد کیلانته^۱

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران-آب، دانشکده عمران، هنر و معماری، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۸/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰)

چکیده

پس از گذشت سال‌ها همچنان بررسی میدان جریان آشفته در بسترهای زبر یکی از مسائل مهم و قابل‌بحث است. در گذشته پژوهشگران عمدتاً بر جریان بستر زبر با استغراق نسبی زیاد و متوسط (نسبت عمق جریان به زبری معادل بستر) پرداخته‌اند، ولیکن در ارتباط با استغراق نسبی کم، پژوهش‌های زیادی صورت نگرفته است. در این پژوهش، به بررسی و مطالعه جریان بستر شنی در شرایط استغراق نسبی کم به صورت عددی و در نرم‌افزار فلوتری‌دی پرداخته شده است. به این منظور، ابتدا مدل عددی ساخته شده به کمک اطلاعات آزمایشگاهی موجود، مورد صحت‌سنجی و کالیبراسیون قرار گرفت. در طی مدل‌سازی‌ها، شش استغراق نسبی متفاوت مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت و پارامترهای معادله لگاریتمی سرعت شامل ضریب وان کارمن، ثابت انتگرالی و صفحه‌ی جابجایی صفر تعیین گردید. نتایج نشان داد که در شرایط بستر صاف ضریب وان کارمن برابر ۰/۴۱ در نظر گرفته می‌شود، ولیکن در شرایطی که بستر زبر بوده و شرایط استغراق نسبی کم حاکم است، این مقدار تغییر کرده و با تغییر استغراق نسبی نیز تغییر پیدا می‌کند. محدوده این تغییرات بین ۰/۲۹ تا ۰/۴۳ می‌باشد. در ادامه مشاهده شد که با افزایش عمق ابتدا ضریب وان کارمن کاهش و در ادامه افزایش پیدا کرده است. همچنین صفحه‌ی جابجایی صفر به هیچ وجه رابطه‌ی منسجم و مشخصی در ارتباط با استغراق نسبی نداشته و نمی‌توان به قطعیت در رابطه با آن اظهار نظر نمود. در پایان به کمک نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی حاضر و مطالعات پیشین برای استغراق نسبی و ضریب وان کارمن، یک تابع دو ضابطه‌ای ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: جریان آشفته، استغراق نسبی، بستر شنی، مدل‌سازی عددی، معادله لگاریتمی.

مقدمه

طبقه‌بندی فوق با چالش بسیاری روبه‌رو است (Nikora, 2008). گروهی از محققان اعتقاد دارند که تا نسبت (عمق آب به اندازه متوسط سنگدانه) ۴۰ را می‌توان استغراق نسبی کم نامید ولی محققانی اعتقاد داشته‌اند که حتی نسبت یک برای نامیدن شرایط استغراق کم نیز کافی است که این پدیده بیشتر در رودخانه‌های کوهستانی رخ می‌دهد (Mohajeri et al., 2018). در رابطه با بحث آشفتگی در بسترهای شنی رودخانه‌ها پژوهش‌های بسیاری انجام شده است. گروهی از محققین بر این باورند که پارامترهای پروفیل لگاریتمی، تابعی از زبری بستر می‌باشد ولی تا به امروز تابع ریاضی مشخصی ارائه نشده است (Mohajeri et al., 2018). همچنین مطالعه‌ی اساسی بر روی فهم فیزیکی پدیده آشفتگی در بستر زبر کامل نشده است.

Pu قانون توزیع سرعت لگاریتمی را برای جریان کانال‌های روباز صاف و زبر پیشنهاد داده است (Pu, 2013). در قانون

اکثر جریان‌های موجود در طبیعت به‌ویژه رودخانه‌های شنی به علت وجود شرایط محیطی همچون بستر زبر و استغراق نسبی پدیده‌ی آشفتگی را تجربه می‌کنند. همچنین جزئیات هیدرودینامیکی جریان در نوع زیستی ارگانسیم‌های زنده تأثیر بسزایی دارند. اگرچه هیدرودینامیک بسترهای زبر بیش از دو دهه مورد بررسی قرار گرفته است ولی همچنان سؤالات مهمی در مورد ارتباط استغراق نسبی کم و متوسط که به‌طور عمده در مجاری کوهستانی در طبیعت رخ می‌دهد، بی‌پاسخ مانده است. بیشتر پژوهش‌ها در حیطه جریان با بستر زبر، برای جریان‌های با استغراق نسبی زیاد انجام شده است. منظور از استغراق نسبی^۱، میزان عمق آب به بعد سنگدانه است. Nikora استغراق نسبی را به چهار دسته کلی استغراق نسبی زیاد، متوسط، کم و موضعی تقسیم کرد، ولیکن مشخص کردن محدوده‌ای از اعداد برای تعیین

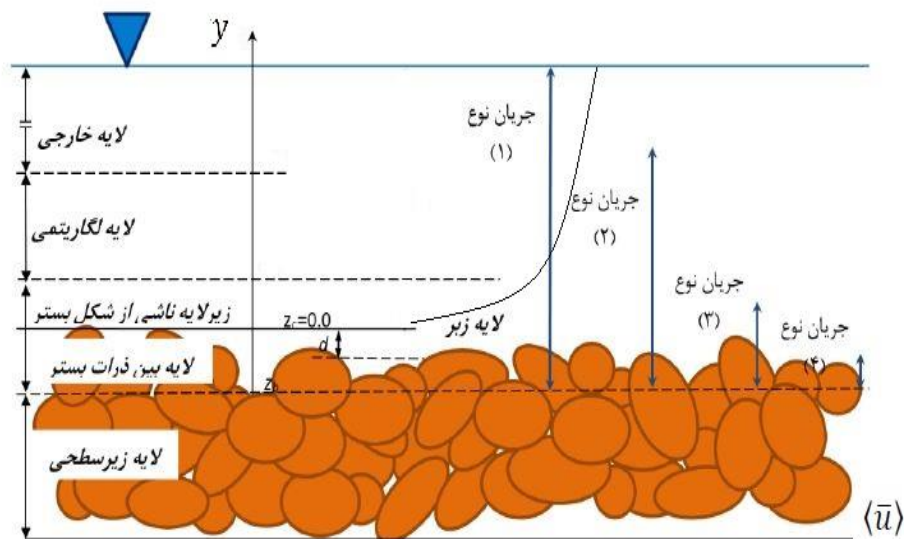
* نویسنده مسئول: m.fazeli@srbiau.ac.ir

می‌باشند.

به‌منظور تعیین ضریب وان کارمن می‌توان از رابطه‌ی (۱) بهره برد. نکته‌ی بسیار حائز اهمیت در این بخش در نظر گرفتن محدوده‌ی اعتبار پروفیل لگاریتمی سرعت است. رابطه‌ی سرعت لگاریتمی درحالی‌که بستر صاف در نظر گرفته شود، تا 0.2 عمق جریان معتبر است. به‌صورت کلی با صرف نظر کردن از محدوده‌ی اعتبار پروفیل لگاریتمی سرعت، با در نظر گرفتن تمامی عمق آب می‌توان ضریب وان کارمن و همچنین ثابت انتگرالی را نیز استخراج نمود.

$$\frac{\langle \bar{u} \rangle}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y-d}{k_s}\right) + C \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در این رابطه $\langle \bar{u} \rangle$ مقدار متوسط زمانی و مکانی سرعت، u_* میزان سرعت برشی، κ ضریب وان کارمن بوده که در بسترهای صاف برابر 0.41 در نظر گرفته می‌شود، d تراز صفحه جابه‌جایی صفر، y عمق آب، k_s ارتفاع زبری معادل و C ثابت انتگرالی است. منظور از تراز صفحه‌ی جابه‌جایی صفر، صفحه‌ای موازی بستر است که در آن محل میزان سرعت در بستر زبر برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. یکی از پیچیده‌ترین و مشکل‌ترین مباحث مربوط به هیدرولیک تعیین مقدار صفحه‌ی جابه‌جایی صفر است که می‌بایست از طریق سعی و خطا مقدار آن را یافت. شکل زیر گویای این مطلب است.



شکل ۱- پروفیل لگاریتمی سرعت با استغراق‌های نسبی مختلف

آغاز شده است. Dittich و koll مشاهده نمودند که با افزایش زبری نسبی جریان آشفتگی رفتاری متفاوت از جریان لایه‌ی مرزی بستر زبر رایج را نشان می‌دهد (Dittich and koll, 1997). در ادامه Koll بیان داشت که در این شرایط جریان را می‌توان از نوع لایه‌ی

پیشنهاد شده که با استفاده از فرضیات جریان متلاطم کامل توسعه یافته است، تأثیر جریان‌های ثانویه لحاظ شده است. Mignot و همکاران تنش‌های برشی رینولدزی، انرژی جنبشی ناشی از آشفتگی و جریان بر روی تکه‌سنگ‌های خرد شده زاویه‌دار را مورد بررسی قرار دادند (Mignot et al., 2009). این محققین تمامی بررسی‌ها را با عدد فرود پایین و زمانی که نوسانات سطح آب قابل صرف نظر بود، در نظر گرفتند. تعدادی از محققین مطالعاتی بر روی جریان‌های با استغراق نسبی زیاد انجام داده‌اند (Ferro and Baiamonte, 1994 و Dittich and koll, 1997). در جریان‌های با استغراق نسبی زیاد، پروفیل لایه لگاریتمی سرعت دارای هم‌پوشانی بین لایه بیرونی جریان و لایه درونی جریان است. تحلیل ابعادی کمک شایانی به شناخت قانون پروفیل لگاریتمی سرعت در استغراق‌های نسبی زیاد می‌نماید. در زیر لایه لگاریتمی، لایه‌های دیگر از جریان وجود دارد که به‌طور مستقیم عناصر زبری بر روی آن اثر می‌گذارد و به نام لایه‌ی زبر معروف است. در لایه‌ی زبر به دلیل وجود هندسه‌ی نامنظم زبری در مقیاس طولی، این امکان وجود ندارد که یک قانون کلی برای پروفیل سرعت پیدا شود. معادله لگاریتمی سرعت همان‌طور که از نامش مشخص است، به‌صورت یک رابطه لگاریتمی بوده و در محدوده $0.02 < y/\delta < 0.2$ اعتبار دارد. که در این رابطه δ ضخامت لایه مرزی است. دو پارامتر اصلی این رابطه ضریب وان کارمن و ثابت انتگرالی بوده که در بسترهای صاف دارای مقادیری ثابت

برخلاف تعدد مطالعات در جریان عمیق با بستر زبر، مطالعات در شرایط جریان کم عمق بسیار محدود است و بسیاری از جنبه‌های این جریان ناشناخته باقی مانده است. مطالعه‌ی جریان در بسترهای با زبری نسبی متوسط از اواخر دهه‌ی ۱۹۹۰

است.

$$V_F \frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} (\rho \rho u_x) + R \frac{\delta}{\delta y} (\rho \rho v_y) \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$+ \frac{\delta}{\delta z} (\rho \rho w_z) + \zeta \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR}$$

که در آن به ترتیب از چپ به راست V_F نسبت پرشدگی سلول در ارتباط با فضای باز، ρ چگالی سیال، R_{DIF} ترم نفوذپذیری آشفتهگی R_{SOR} برابر منبع جرم است. u ، v و w نیز سرعت در جهت‌های x ، y و z می‌باشند. همچنین در مختصات کارتزین مقدار R برابر یک خواهد بود. پارامتر A نیز مساحت کسری محیط به جریان در راستاهای مختلف است. همچنین مقدار R_{DIF} عبارت پخش آشفتهگی بوده و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$R_{DIF} = \frac{\delta}{\delta x} (v_\rho A_x \frac{\delta \rho}{\delta x}) + R \frac{\delta}{\delta y} (v_\rho A_y R \frac{\delta \rho}{\delta y}) + \frac{\delta}{\delta z} (v_\rho A_z \frac{\delta \rho}{\delta z}) + \zeta \frac{\rho u A_x}{x} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن:

$$v_\rho = C_\rho \mu / \rho \quad (\text{رابطه ۴})$$

μ برابر ضریب پخش مومنتوم و C_ρ مقداری ثابت است و در نهایت پارامتر R_{SOR} عبارت مربوط به چگالی است و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{\delta}{\delta x} (u A_x) + R \frac{\delta}{\delta y} (v A_y) + \frac{\delta}{\delta z} (w A_z) + \zeta \frac{\rho u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (\text{رابطه ۵})$$

در جریان‌های آشفته، معادله‌ی مومنتوم در نرم‌افزار فلوتریدی همان معادله‌های ناویر استوکس هستند. با این تفاوت که به علت وجود نوسانات سرعت در زمان، پارامتر دیگری اضافه می‌شود. اضافه شدن این ترم اضافی سبب می‌شود که معادلات ناویر استوکس به اصطلاح بسته نشوند. یافتن این پارامتر اضافی اساس پیدایش مدل‌سازی‌های آشفتهگی می‌باشند. این معادلات در سه جهت به شرح زیر می‌باشند.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + \zeta \frac{v^2 A_y}{x V_F} = \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$- \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \zeta \frac{w v A_y}{x V_F} = \quad (\text{رابطه ۷})$$

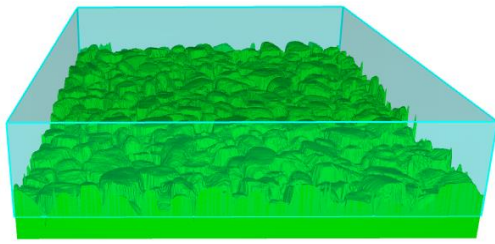
$$- \frac{1}{\rho} R \frac{\partial p}{\partial x} + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s)$$

مرزی دانست، هر چند که بسیاری از فرض‌های رایج در این نوع جریان مانند ثابت بودن عدد وان کارمن و ثابت انتگرال‌گیری موردتردید است (Koll, 2006). Katul و همکاران نیز به این نتیجه رسیدند برای نسبت استغراق نسبی کمتر از ۱۰ می‌توان از تئوری لایه‌ی مرزی بهره برد (Katul et al., 2002). Manes و همکاران ساختار آشفتهگی جریان را در کانال‌های روباز با عمق کم (نسبت به ارتفاع زبری) تا لایه‌ای که پروفیل سرعت در آن لگاریتمی می‌شود، اما به اندازه‌ای گسترده نیست که به لایه خارجی برسد و تحت اثر زبری کف نباشد را بررسی کردند (Manes et al., 2007). Afzalimehr و همکاران بیان کردند پیروی یا عدم پیروی از توزیع لگاریتمی برای نیم‌رخ‌های سرعت جریان به دلیل تأثیر متقابل زبری عناصر و شکل آن‌ها بر دینامیک جریان متلاطم و چگونگی توسعه‌ی لایه‌ی مرزی متلاطم در عمق جریان است و بر اساس غالب و مغلوب بودن هر یک از این عوامل روند توزیع این نیم‌رخ‌ها متفاوت خواهد بود (Afzalimehr et al., 2011). Mohajeri و همکاران نشان دادند برای حالتی از جریان که میزان ارتفاع زبری بستر نسبت به عمق جریان زیاد است، یافتن یک قانون کلی برای تعیین رابطه پروفیل جریان به دلیل اثرگذاری هم‌زمان پارامترهای لایه خارجی در کنار لایه درونی و در نتیجه عدم توانایی استفاده از تحلیل ابعادی بسیار مشکل است (Mohajeri et al., 2015).

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته می‌توان بیان داشت که بسیاری از جنبه‌های جریان با استغراق نسبی کم هنوز نامشخص باقی مانده است. بر این اساس در مطالعه حاضر به بررسی عددی این نوع جریان پرداخته خواهد شد. به بیان دقیق‌تر، این مطالعه به بررسی شرایط و نحوه تغییرات معادله لگاریتمی سرعت در این نوع جریان اختصاص دارد که در ادامه مدل‌سازی‌ها و نحوه انجام تحقیق معرفی می‌شود.

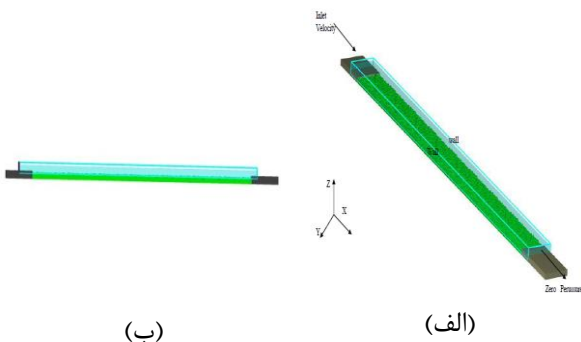
معادلات حاکم و مدل‌سازی عددی

اساس معادلات تحلیل میدان جریان در رودخانه‌ها، معادلات ناویر استوکس است. یکی از فرضیات به دست آوردن معادلات ناویر استوکس، برقراری جریان در حالت آرام است. ولی زمانی که جریان به صورت آشفته باشد، معادلات ناویر استوکس دارای جواب‌های مناسبی نیست. چرا که اثر نوسانات سرعت در زمان در حالتی که جریان آشفته است، غیرقابل صرف نظر کردن است و می‌بایست از معادلات ناویر استوکس در زمان متوسط‌گیری نمود. پس از متوسط‌گیری زمانی از معادله پیوستگی، معادله‌ی پیوستگی در حالت آشفته به شکل معادله‌ی زیر حاصل می‌گردد. لازم به ذکر است که ζ پارامتر مربوط به نوع سیستم مختصات



شکل ۲- بستر فیزیکی ساخته شده در نرم افزار فلو تری دی از مدل رقمی اندازه گیری شده

فلوم مورد استفاده در این آزمایش ها، یک فلوم به طول ۶ متر، عرض و ارتفاع ۰/۴ متر است که در شکل (۳) نمایش داده شده است. در این شکل شرایط مرزی مورد استفاده نیز نمایش داده شده است. مشاهده می شود که در مرز ورودی سرعت ثابت و در مرز خروجی فشار صفر به مدل اعمال شده است. مدل سازی های گذشته نشان داده است که روش VOF در مدل سازی مرز سیال و هوا بهترین حالت برای شبیه سازی سطح آزاد آب است، بنابراین در مطالعه حاضر روش یاد شده به کار گرفته شد (Hirt and Nichols, 1981). در بررسی های صورت گرفته طول، عرض و ارتفاع فلوم به ترتیب در جهت محور x، y و z است. همچنین به منظور جلوگیری از اغتشاش های ناخواسته ناشی از ورود ناگهانی جریان به بستر زبر، از دو بلوک مستطیلی هم تراز مرتفع ترین سنگدانه استفاده گردید. یکی از مهم ترین ویژگی های مطالعه حاضر، شبیه سازی بستر شنی به صورت فیزیکی است، در حالی که در تمامی مطالعات پیشین عددی در رابطه با بستر زبر، زبری به کمک وارد کردن میزان ضریب زبری تعیین می شود.



شکل ۳- شمای کلی کانال مدل سازی همراه با شرایط مرزی در نرم افزار فلو تری دی (الف) با در نظر گرفتن شیب (ب) نمای روبرو

در ادامه به منظور شبکه بندی ناحیه مورد بررسی، ابتدا تحلیل شبکه صورت پذیرفت و مشخص گردید که با کوچک شدن شبکه از مقداری مشخص فقط در هزینه های محاسباتی تأثیر گذار بوده است و در نتایج استخراج شده تأثیر بسزایی نداشته است. سپس در نهایت یک بلوک شبکه ساختار یافته انتخاب گردید. ابعاد المان ها در ارتفاع، عرض و طول به ترتیب برابر ۲ میلی متر، ۱۰ و

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \quad (\text{رابطه ۸})$$

در این معادله ها، b میزان افت جریان در محیط دارای تخلخل (نفوذ پذیری)، G، شتاب های بدنه ای و f، شتاب های ناشی از لزجت سیال است. مقادیر w میزان تنش های ایجاد شده بر روی دیواره می باشند. در صورتی که در روی سطح هیچ گونه اصطکاکی وجود نداشته باشد، مقدار این پارامتر برابر صفر خواهد بود. اساس مدل های آشفتگی به روش RANS، تعیین لزجت گردابه ای را بیان نموده است. یکی از این مدل ها، مدل آشفتگی K-ε RNG است. در این مطالعه نیز از این مدل آشفتگی برای تحلیل جریان در بستر شنی استفاده گردیده است. رابطه ی زیر ارتباط بین لزجت گردابه ای و K (انرژی آشفتگی) و ε (اضمحلال انرژی) را نشان می دهد.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^3}{\varepsilon} \quad (\text{رابطه ۹})$$

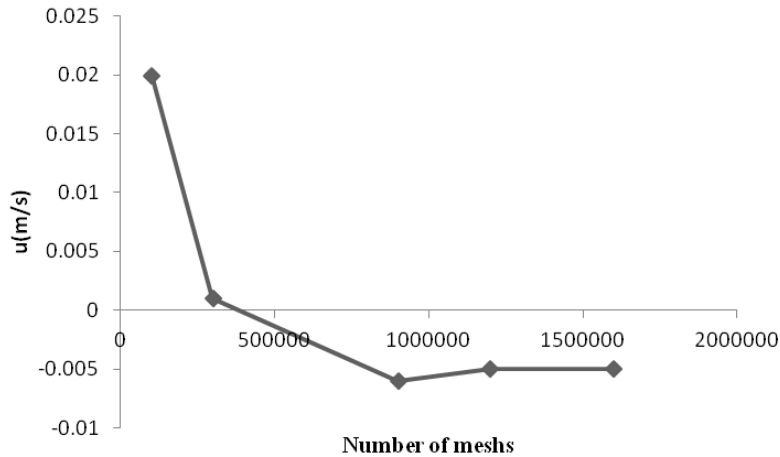
که در این رابطه C_μ یک ضریب ثابت است که به طور معمول برابر ۰/۰۹ در نظر می گیرند (Saneinejad, 2015)

مدل سازی عددی در مطالعه حاضر

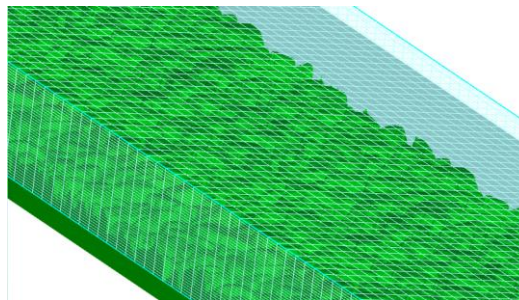
در این پژوهش از نرم افزار تجاری فلو تری دی ۱۱-۰-۴ که یک نرم افزار تخصصی برای مدل سازی جریان و رسوب به صورت سه بعدی است، استفاده گردید. حل عددی معادلات حاکم در نرم افزار فلو تری دی با استفاده از روش احجام محدود صورت می گیرد. شبیه سازی ها در مطالعه حاضر مربوط به مدل سازی اطلاعات آزمایشگاهی (Mohajeri, 2014) است. سنگدانه ها در مطالعه (Mohajeri et al., 2015) دارای اندازه D₅₀ برابر ۲۲ میلی متر و D₉₀ ذرات بستر کف برابر ۲۹ میلی متر است. بستر شنی در مطالعه (Mohajeri et al., 2015)، توسط دستگاه لیزر اسکنر^۲ موجود در آزمایشگاه ترنتو ایتالیا به مدل رقمی تبدیل شد. این برداشت ها تنها در محدوده ای برابر ۰/۶ متر از کانال با دقت حدود ۱ میلی متر انجام شده بود. به منظور تهیه بستر زبر در کانال شبیه سازی شده در نرم افزار فلو تری دی، ابتدا فایل متنی مدل رقمی، وارد نرم افزار فلو تری دی شد. نرم افزار فلو تری دی این قابلیت را دارد که فایل توپوگرافی (x,y,z) را به عنوان ورودی دریافت کرده و یک فایل با فرمت stl بسازد که می توان آن را به عنوان جسم solid در نظر گرفت. در ادامه مدل رقمی بستر به صورت فایل با فرمت stl آماده شد. سپس این رقم تا طول ۶ متری کانال تکرار گردید. شکل (۲) بستر فیزیکی ساخته شده ابتدایی را نشان می دهد.

و سرعت طولی در وسط کانال در نزدیکی سنگدانه را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۵) نحوه‌ی شبکه‌بندی ناحیه مورد نظر آورده شده است.

۶ میلی‌متر در نظر گرفته شد و در مجموع ۱۶۰۰۰۰۰ المان در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. به منظور تعیین شبکه مناسب از تعداد مش‌های ۱۰۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰۰، ۱۲۰۰۰۰۰ و ۱۶۰۰۰۰۰ بهره برده شد. شکل (۴) رابطه بین مش



شکل ۴- رابطه بین تعداد مش و سرعت طولی



(الف)



(ب)

شکل ۵- الف) ناحیه شبکه‌بندی در فلووم شبیه‌سازی شده ب) شبکه‌بندی در نزدیکی سنگدانه‌ها

مدل ساخته شده از یکی از حالت‌های مورد بررسی در آزمایشگاه توسط (Mohajeri et al., 2015) استفاده شد که شرح مختصری از شرایط هیدرولیکی آن در جدول (۱) آورده شده است.

همان‌طور که مشخص شده است ابعاد شبکه‌ها از ابعاد سنگدانه‌ها کوچک‌تر در نظر گرفته شده است. به همین دلیل در مدل‌سازی‌های مطالعه حاضر، قابلیت بررسی جریان حول سنگدانه با شبکه پیشنهاد شده وجود دارد. به منظور صحت‌سنجی

جدول ۱- شرایط هیدرولیکی در یکی از حالات بررسی شده توسط Mohajeri et al. (2015)

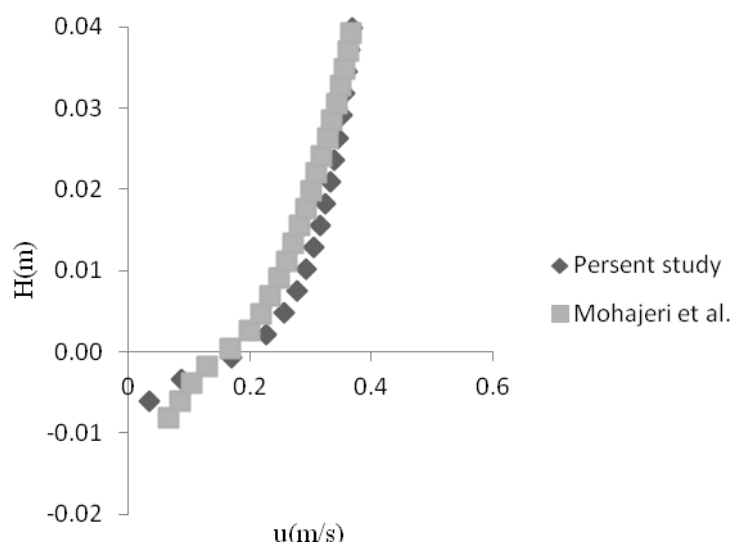
H (mm)	S	Fr	Re	k_s^+	H/ k_s	Q (L/S)
۵۲	۰/۰۰۲۶	۰/۴۷	$۱/۷۶ \times ۱۰^۶$	۲۰۱/۰۳	۹/۰۹	۷/۰۵

پروفیل سرعت متوسط‌گیری شده‌ی (Mohajeri et al., 2015) در شکل (۶) آورده شده است. منظور از متوسط‌گیری دوگانه این است که یک‌بار در مکان و یک‌بار در زمان از مقادیر سرعت متوسط‌گیری شده است. همچنین تا کنون گزارشی مبنی بر این‌که مقدم بودن متوسط‌گیری زمان بر مکان و یا بالعکس تأثیری در پروفیل سرعت نهایی دارد، نشده است. در مدل‌سازی انجام‌شده، میزان مجموع مربعات خطا (RMSE) برابر با ۳/۲ درصد حاصل شده است که با توجه به نظریه‌های آماری مقدار مناسبی برای صحت مدل‌سازی انجام‌شده می‌باشد. این مقدار در نواحی نزدیک بستر (تا حدود تراز ۰/۰۲ میلی‌متر) که بحث اصلی این مقاله می‌باشد، برابر ۵ درصد حاصل گشته است که همچنان می‌توان تا حدود مطلوبی صحت‌سنجی انجام شده را درست تلقی نمود. خطای ایجاد شده‌ی بیش‌تر در کف را می‌توان به علت خطای لیزر رقومی‌ساز بستر کف عنوان کرد که باعث شده داده‌هایی که به نرم‌افزار داده شده است، دارای مقداری خطا باشد. علت دیگری که می‌تواند سبب تفاوت جزئی در نتایج آزمایشگاهی و عددی باشد، وجود خطای ناشی از گرد کردن رایانه است که خاصیت ذاتی مدل‌سازی‌های عددی می‌باشد.

که در آن K_s^+ ، میزان رینولدز بر حسب زبری و به طریق زیر محاسبه می‌شود:

$$k_s^+ = \frac{u_* k_s}{\nu} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

همچنین در آن H، عمق آب، S، شیب فلوم، Fr عدد فرود، Re، عدد رینولدز و Q دبی بر حسب لیتر بر ثانیه است. در این اجرا، پس از گذشت ۶۷ ثانیه، جریان به شرایط پایا رسید و پس از آن به‌منظور بررسی دقیق‌تر، مدت ۲۰ ثانیه دیگر، در هر ۰/۰۱ ثانیه، نتایج مدل برای تمامی گره‌های محاسباتی دریافت شد. زمان به پایان رسیدن این اجرا با استفاده از کامپیوتر ۸ هسته‌ای در حدود ۳۶ ساعت بوده است (مدت زمانی که طول کشیده شد تا مدل به‌طور کامل اجرا گردد). پس از آن، در ناحیه‌ای از فلوم که جریان به‌طور کامل توسعه یافته شده بود (محلی که دیگر در راستای طولی پروفیل سرعت بدون تغییر شده است (از ۳/۱ متر پس از شروع فلوم تا ۳/۷ متر پس از آن) و در محدوده‌ای از جریان که با دیواره از هر طرف، ۱۵ سانتی‌متر فاصله داشت، پروفیل سرعت در زمان و مکان (پروفیل سرعت متوسط‌گیری شده‌ی دوگانه) استخراج گردید که نتیجه‌ی حاصل از آن در مقایسه با



شکل ۶- مقایسه پروفیل سرعت متوسط دوگانه سرعت در تحقیق حاضر و Mohajeri et al. (2015)

گرفت. در جدول یادشده، k_s با توجه به یافته‌های (Mohajeri, 2014) برابر ۶/۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود مقادیر k_s^+ که در مطالعه حاضر از مقدار ۷۰ بیشتر شده‌اند، بیانگر شکل گرفتن جریان زبر می‌باشند. همچنین

نتایج و بحث

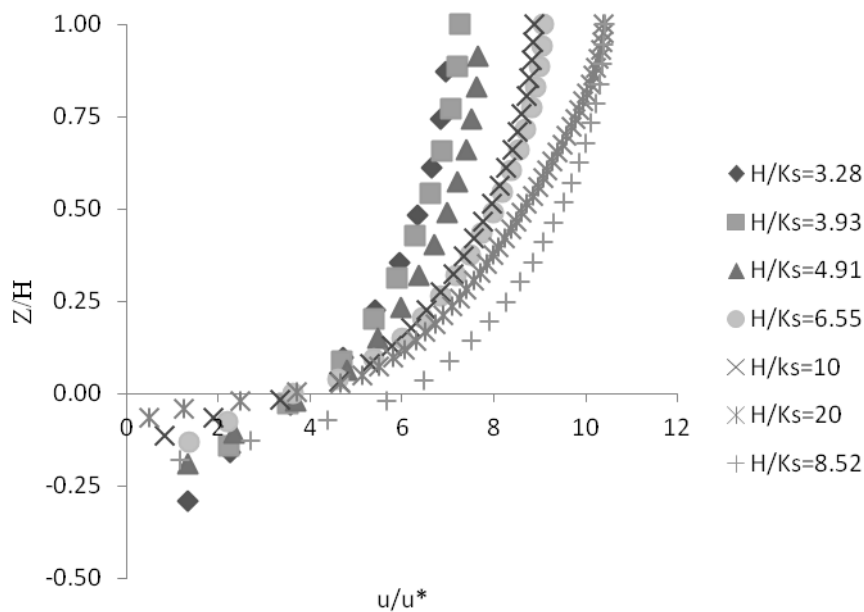
پس از حصول اطمینان از صحت عملکرد مدل عددی، در ادامه برخی از ویژگی‌های هیدرولیکی به‌ازای استغراق‌های نسبی متفاوت که در جدول (۲) آمده است، مورد بررسی و مطالعه قرار

حالتی که بر روی آن صحت سنجی صورت پذیرفت، است. در ادامه پس از اجرای مدل‌های عددی و انجام متوسط-گیری دوگانه برای حالت‌های مورد بررسی استغراق نسبی، پروفیل سرعت بی‌بعد شده توسط سرعت برشی ترسیم و در شکل (۷) ارائه شده است.

مقدار سرعت برشی (u^*) نیز محاسبه شد. با توجه به در دسترس بودن داده‌ها برای عمق ۴۰ میلی‌متر در پژوهش (Mohajeri et al., 2015) از ورودی‌های آزمایشگاهی برای مدل‌سازی استفاده گردید و سرعت به‌طور فرضی برای آن در نظر گرفته نشد. لازم به ذکر است که شیب در نظر گرفته شده در حالات دیگر مشابه

جدول ۲- شرایط هیدرولیکی در نظر گرفته شده به ازای استغراق‌های نسبی متفاوت

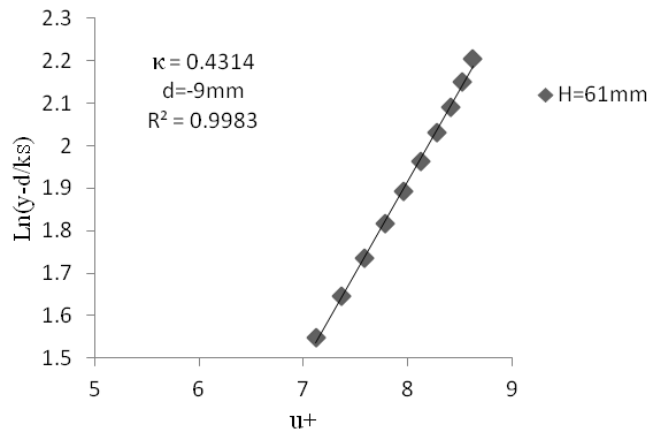
شماره اجرا	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇
H	۲۰	۲۴	۳۰	۴۰	۵۲	۶۱	۱۲۲
H/ks	۳/۲۸	۳/۹۳	۴/۹۲	۶/۵۶	۸/۵۲	۱۰	۲۰
Fr	۰/۳۲	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۵۱	۰/۴۷	۰/۳۴	۰/۳۳
ks ⁺	۱۳۱	۱۴۲	۱۵۷	۱۷۷	۲۰۱	۲۱۰	۲۶۷
Re	۲۵۵۵	۳۳۶۰	۴۶۶۴	۷۰۰۰	۱۴۸۵۷	۱۲۳۲۸	۲۵۵۸۰
Q(l/s)	۱/۱۲	۱/۵	۱/۲	۵/۱	۷/۰۵	۶/۴۳	۱۷/۷۶
u^*	۰/۰۲۱	۰/۰۲۳	۰/۰۲۵	۰/۰۲۹	۰/۰۳۲	۰/۰۳۴	۰/۰۴۳۹



شکل ۷- مقایسه پروفیل سرعت متوسط دوگانه سرعت بی‌بعد شده توسط سرعت برشی در استغراق‌های نسبی متفاوت

جابجایی صفر را آن قدر تغییر داده تا بیشترین مقدار ضریب همبستگی حاصل گردد. در نهایت شیب قرائت شده در این حالت ضریب وان کارمن می‌باشد. شکل (۸) به صورت نمونه برای عمق ۶۱ میلی‌متر، نحوه‌ی محاسبه‌ی ضریب وان کارمن را نشان می‌دهد.

میزان ضریب وان کارمن توسط نرم‌افزار اکسل و خط برازش تعیین شد. روند تعیین ضریب وان کارمن به این گونه صورت پذیرفت که ابتدا ناحیه‌ای از نقاط که دارای روند یکسانی بوده‌اند را انتخاب کرده و سپس با یک مقدار مشخص از تراز صفحه‌ی جابجایی صفر خطی به آن برازش داده شد. سپس مقدار صفحه‌ی



شکل ۸- نحوه محاسبه ضریب وان کارمن در عمق ۶۱ میلی متری

که در آن :

$$u^+ = \frac{u}{u_*} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

در جدول (۳) به طور اجمالی به ازای استغراق‌های نسبی مختلف، مقدار ضریب وان کارمن، ثابت انتگرالی و مقدار صفحه‌ی جابه‌جایی صفر ارائه شده است. همان‌طور که از جدول یادشده، مشهود است با تغییر در استغراق نسبی، میزان ضریب وان کارمن که در بسترهای صاف ثابت و برابر با ۰/۴۱ در نظر گرفته می‌شود، در بسترهای زبر و به‌ویژه در استغراق‌های نسبی کم، برابر با عدد ثابتی نبوده و در بیشتر حالات کمتر از شرایط بستر صاف می‌شود. همچنین تراز صفحه‌ی جابه‌جایی صفر و ثابت انتگرالی نیز با تغییر استغراق نسبی تغییر کرده است و نمی‌توان به‌طور الزام‌آوری بیان داشت که در مرتفع‌ترین سنگدانه همواره صفحه صفر تشکیل می‌شود.

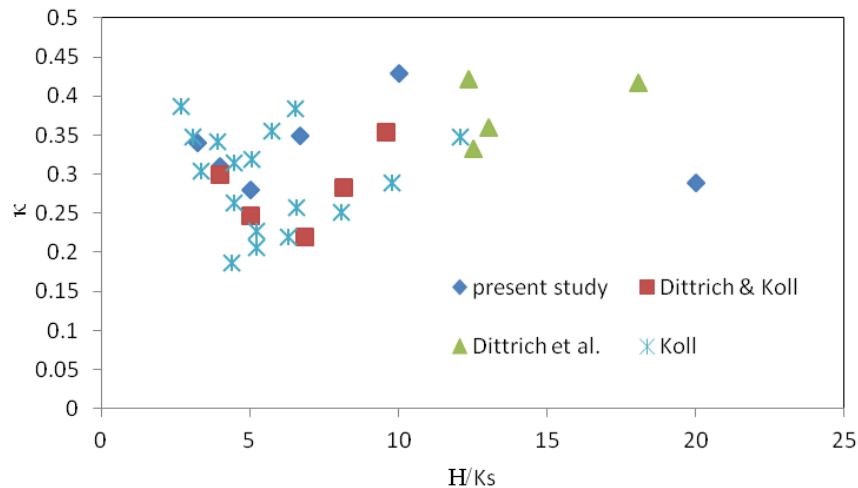
نسبی کم و متوسط اطلاعات آزمایشگاهی جمع‌آوری نموده‌اند، مقایسه شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصله شباهت زیادی به نتایج حاصل‌شده از پژوهش (Dittrich and Koll, 1997) دارد. مقایسه نتایج حاصل‌شده با نتایج سایر دانشمندان نشان می‌دهد که مقادیر ضریب وان کارمن به‌طور الزام‌آوری با افزایش استغراق نسبی افزایش و یا کاهش نمی‌یابد. به بیان دقیق‌تر رفتار کاهشی یا افزایشی ثابتی را نمی‌توان از اطلاعات موجود استخراج نمود. با این وجود، می‌توان بیان داشت با صرف‌نظر از اطلاعات (Koll, 2006)، در سایر اطلاعات حداقل ضریب وان کارمن در محدوده استغراق نسبی ۵ الی ۶/۶ مشاهده شده است. همچنین در حالی که مقدار ضریب وان کارمن در بسترهای صاف برابر ۰/۴۱ در نظر گرفته می‌شود، اما نتایج این تحقیق و پژوهش سایر دانشمندان نشان می‌دهد که ضریب وان کارمن در بسترهای زبر و در استغراق‌های نسبی خاص می‌تواند مقادیری به‌مراتب کوچک‌تر مانند ۰/۲ را کسب نماید.

جدول ۳- تغییرات ضریب وان کارمن، ثابت انتگرالی و صفحه‌ی جابه‌جایی

صفر به‌ازای استغراق نسبی متفاوت				
H (mm)	H/ks	κ	C	d (mm)
۲۰	۳/۲۸	۰/۳۴	۳/۱۸	-۸
۲۴	۳/۹۳	۰/۳۰	۳/۲۱	-۹
۳۰	۴/۹۲	۰/۲۸	۵/۳۴	-۱۶
۴۰	۶/۵۶	۰/۳۵	۶/۱۰	-۱۸
۵۲	۸/۵۲	۰/۲۷	۳/۶۳	-۱۷
۶۱	۱۰	۰/۴۳	۳/۵۶	-۹
۱۲۲	۲۰	۰/۲۹	۱/۱۸	-۲۱

نکته‌ی جالب‌توجه در مقایسه‌ی بین نتایج حاصل‌شده از پژوهش حاضر و سایر دانشمندان، این است که در بیشتر حالات، ضرایب وان کارمن برای دانشمندان دیگر همانند پژوهش حاضر از مقدار ضریب وان کارمن در حالت بستر صاف (۰/۴۱) کمتر بوده است و در تعداد بسیار محدودی از این مطالعات مقداری بیشتر از ۰/۴۱ را نشان می‌دهد. این مسئله نشان می‌دهد که ضریب وان کارمن به عواملی غیر از استغراق نسبی وابسته بوده و همچنین حاکی از باقی ماندن اثر جداره در محدوده بیشتری از عمق جریان است به‌نحوی که اثر زبری در لایه لگاریتمی و نحوه توسعه آن اثرگذار است. بررسی دقیق این اثر و نیز کمی‌سازی این اثر می‌تواند موضوع مناسبی برای پژوهش‌های آتی باشد.

پس از تعیین ضریب وان کارمن به‌ازای استغراق‌های نسبی متفاوت در این پژوهش، در شکل (۹) نتایج با یافته‌های حاصل‌شده توسط سایر محققین که در شرایط جریان با استغراق



شکل ۹- مقایسه‌ی ضرایب وان کارمن در این پژوهش با پژوهش‌های مشابه

میزان ضریب همبستگی در دو معادله از مقدار مطلوبی برخوردار است، و به‌عنوان یک رابطه‌ی اولیه به منظور تخمین ضریب وان کارمن هنگامی که استغراق نسبی بالا نیست، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در شکل (۱۰) مقایسه فرمول‌های به‌دست‌آمده با نتایج مطالعه حاضر نشان داده شده است.

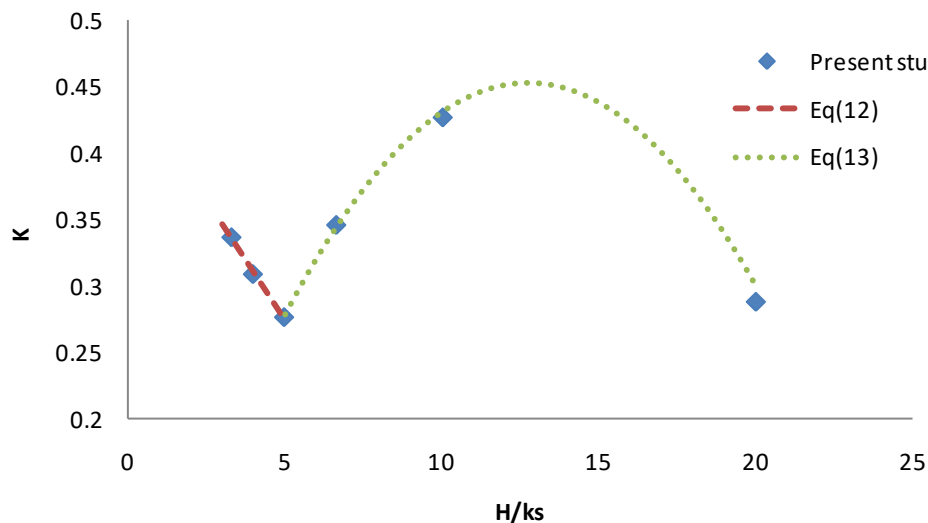
(رابطه ۱۲)

$$k = -0.036 \left(\frac{H}{k_s}\right) + 0.4538 \quad 3.3 < \frac{H}{k_s} < 5 \quad (R = 0.9962)$$

(رابطه ۱۳)

$$k = -0.0029 \left(\frac{H}{k_s}\right)^2 + 0.074 \left(\frac{H}{k_s}\right) - 0.0187 \quad 5 < \frac{H}{k_s} < 20 \quad (R = 0.9994)$$

نمودار شکل (۹) یکی از نمودارهای مهم است. اهمیت این نمودار از این جهت است که می‌توان با استفاده از آن رابطه‌ای برای ضریب وان کارمن نسبت به استغراق نسبی استخراج نمود. به این منظور به کمک اطلاعات مطالعه حاضر همراه با سایر اطلاعات موجود در این شرایط (مطالعات Dittrich Koll, 2006; & Koll, 1997)، رابطه‌ای بین استغراق نسبی و ضریب وان کارمن ارائه گردید. رابطه ارائه‌شده به کمک نرم‌افزار اکسل و با استفاده از روش حداقل مربعات استخراج شده است. بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که بهترین رابطه باید از نوع یک معادله دو ضابطه‌ای در دو حالت H/k_s کم‌تر و بیش‌تر از ۵ باشد. معادله نمایش داده در زیر معادله پیشنهادی در این شرایط است که با دقت مناسبی می‌تواند ضریب وان کارمن را برآورد نماید. لازم به ذکر است که



شکل ۱۰- مقایسه‌ی ضرایب وان کارمن در مطالعه حاضر و فرمول‌های پیشنهادی

نتیجه گیری

در این پژوهش شرایط جریان در بستر شنی با استغراق نسبی کم مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. از ویژگی های بارز این پژوهش که باعث متمایز شدن آن نسبت به پژوهش های مشابه می گردد، مدل سازی بستر زبر به صورت فیزیکی و نه به کمک ضریب زبری قابل اعمال در نرم افزار است. در نخستین گام از پژوهش حاضر، صحت سنجی مدل های عددی به کمک اطلاعات آزمایشگاهی موجود مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت که با تقریب خوبی نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی ذکر شده هم خوانی داشت. در ادامه و پس از صحت سنجی، شش حالت دیگر مورد بررسی قرار گرفت و ضرایب وان کارمن، صفحه جابجایی صفر و ثابت انتگرالی استخراج شد و با پژوهش سایر دانشمندان مورد مقایسه قرار گرفت. همان طور که بیان شد، وجود عامل زبری به-خصوص در استغراق های نسبی کم، سبب عدم تشکیل پروفیل لگاریتمی در 0.2 عمق جریان می شود و همچنین باعث می شود که ضرایب ثابت از قبیل ضریب وان کارمن تغییر کرده و برابر مقدار خود در بستر صاف نباشد. با افزایش عمق ابتدا ضریب وان کارمن روند کاهشی داشته است و پس از آن ضریب وان کارمن روند افزایشی پیدا می کند که این تغییر در H/ks حدود 5 است. این مشاهده در تطابق با یافته محققین پیشین است که روند کاهشی و سپس افزایشی ضریب وان کارمن را با کاهش نسبت استغراق گزارش نموده اند. عامل دیگری که پیشنهاد می شود در مطالعات مورد بررسی قرار گیرد، اثر جریانات ثانویه در تغییر ضریب وان کارمن است که با توجه به نوع مدل آشفتگی انتخاب-شده در این پژوهش، توانایی بررسی این نوع از جریان ها وجود نداشته است. در نهایت براساس اطلاعات آزمایشگاهی مطالعه حاضر و اطلاعات مطالعات پیشین یک معادله دوضابطه ای جهت برآورد ضریب وان کارمن پیشنهاد شد.

علائم و نمادها

Re_z : میزان رینولدز در جهت ارتفاعی

u_* : سرعت برشی

b : عرض فلولم

Q : دبی بر حسب لیتر بر ثانیه

\bar{u} : سرعت متوسط گیری شده در مکان و زمان

A : سطح مقطع خیس شده

B : بیانگر تولید یا اتلاف بویانسی ناشی از میدان چگالی نوسان

کننده ی جریان

C : ثابت انتگرالی پروفیل لگاریتمی سرعت

d : صفحه جابه جایی صفر

Fr : عدد فرود

G : بیانگر میزان تولید انرژی آشفتگی ناشی از اندرکنش بین

جریان متوسط و میدان جریان آشفته

H : عمق آب

K : انرژی جنبشی ناشی از آشفتگی

n : ضریب زبری مانینگ

R_{DIF} : ترم نفوذپذیری آشفتگی

R_{SOR} : برابر منبع جرم است.

S : شیب طولی

V_F : نسبت پرشدگی سلول در ارتباط با فضای باز

Z : تراز آب در راستای محور عمودی

علائم یونانی

Δ^+ : زبری بی بعد شده

μ_t : ویسکوزیته گردابه ای

σ_K : عدد پرانتل

σ_ϵ : عدد اشمیت

η : نسبت زمان مشخصه آشفتگی به زمان مشخصه ی میدان

جریان

Δ : زبری معرف بستر

δ : ضخامت لایه ی مرزی

κ : پارامتر موثر در انتخاب مختصات نرم افزار فلوتریدی

K : ضریب وان کارمن

ρ : جرم واحد حجم سیال

ϵ : نرخ اضمحلال انرژی

REFERENCES

- Afzalimehr, H., Gallichand, J., Jueyi, S.U.I. and Bagheri, E. (2011). "Field investigation on friction factor in mountainous cobble-bed and boulder-bed Rivers." *International Journal of Sediment Research*, 26(2), pp.210-221.
- Dittrich, A. and Koll, K. (1997). "Velocity field and resistance of flow over rough surfaces with large and small relative submergence." *Int. J. Sediment Res*, 12(3), pp.21-33.

- Ferro, V. and Baiamonte, G., 1994. Flow velocity profiles in gravel-bed Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(1), pp.60-80.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D., (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of computational physics*, 39(1), pp.201-225.
- Katul, G., Wiberg, P., Albertson, J. and Hornberger, G. (2002). "A mixing layer theory for flow resistance

- in shallow streams." *Water Resources Research*, 38(11), pp.32-1.
- Koll, K. (2006), September. "Parameterisation of the vertical velocity profile in the wall region over rough surfaces." In *River flow* (pp. 163-172). Taylor & Francis.
- Manes, C., Pokrajac, D. and McEwan, I., 2007. Double-averaged open-channel flows with small relative submergence. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(8), pp.896-904.
- Mignot, J., C. de Boyer Montégut, and M. Tomczak (2009), on the porosity of barrier layers, *Ocean Sci.*, 5, 379–387
- Mohajeri, S.H. (2014). "Hydrodynamics of gravel bed flows (implication on colmation)" (Doctoral dissertation, Queen Mary University of London).
- Mohajeri, S.H., Grizzi, S., Righetti, M., Romano, G.P. and Nikora, V. (2015). "The structure of gravel bed flow with intermediate submergence: A laboratory study." *Water Resources Research*, 51(11), pp.9232-9255.
- Mohajeri, S.H., Kashmari, Kh. Zarrati, A.M. Azarpira, M., (2018). Characterization of double-averaged velocity profile in an open-channel with intermediate relative roughness, *Amirkabir J. Civil Eng (in Farsi)*.
- Nikora, V. (2008), Hydrodynamics of gravel-bed Rivers: Scale issues, in *Gravel Bed Rivers VI: From Process Understanding to River Restoration*, edited by H. Habersack, H. Piegay, and M. Rinaldi, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Pu, J.H. (2013). Universal velocity distribution for smooth and rough open channel flows. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 6, No. 3, pp. 413-423
- Saneinejad, M., (2015). *An introduction turbulent flows a turbulence modeling*. 2th Ed, Tehran. (In Farsi)