

شبیه‌سازی سه‌بعدی تنش برشی در کانال مرکب مستطیلی با استفاده از مدل عددی Ansys Fluent

رضوان ولی‌زاده^۱ و علی آرمان^{۲*}

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد؛ و استادیار گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۲۹

چکیده

پیش‌بینی تنش برشی در کانال‌های روباز در بسیاری از مسائل مهندسی مانند طراحی کانال‌های پایدار، محاسبه افت انرژی و رسوب‌گذاری در کانال‌ها با اهمیت است. در مواقع سیلابی، به دلیل تفاوت عمق جریان بین کانال اصلی و دشت‌های سیلابی اطراف، سرعت جریان نیز متفاوت است و متعاقباً میزان تنش برشی و توزیع آن به شکلی چشمگیر تغییر می‌کند. در تحقیق حاضر، کارایی مدل عددی سه‌بعدی Ansys Fluent در شبیه‌سازی پارامترهای مختلف هیدرولیکی برای کانال مرکب مستطیلی با بسترهای صاف و زیر بررسی شده است. مدل آشفتگی و شبکه‌مش بندی به کمک نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی و مدل عددی صحت‌سنجی و سناریوهای مختلف به کمک مدل عددی مذکور شبیه‌سازی شد. مقایسه مقادیر تنش برشی نشان می‌دهد که با کاهش عمق در دشت‌های سیلابی، میزان و درصد تنش برشی در دشت‌های سیلابی افزایش و در کانال اصلی کاهش می‌یابد و با افزایش زبری، میزان تنش برشی افزایش می‌یابد. نتایج بررسی‌ها همچنین بیانگر این نکته است که با افزایش دبی قدرت جریان افزایش می‌یابد و در محل تلاقی دشت‌های سیلابی و کانال اصلی سرعت بیشتر است و گردابه‌هایی در این محل تشکیل می‌شود. نتایج این تحقیق می‌تواند در طراحی کانال‌های پایدار به خصوص در محل تلاقی کانال اصلی و دشت‌های سیلابی نقش بسزایی داشته باشد.

واژه‌های کلیدی

دشت‌های سیلابی، کانال اصلی، کانال روباز

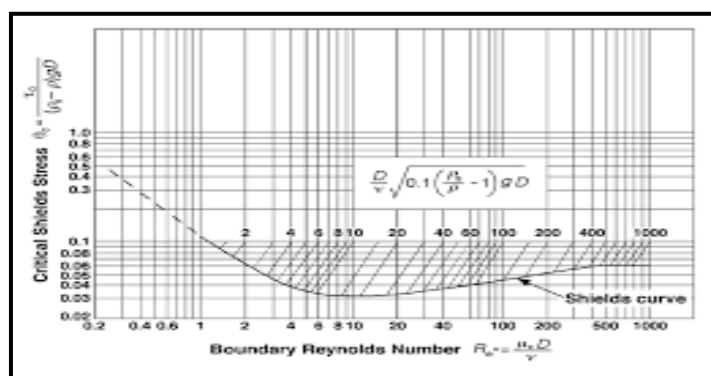
مقدمه

در مطالعات فرسایش و رسوب‌گذاری و طراحی پوشش‌های حفاظتی از اهمیتی خاص دارد. هنگامی که آب در کانالی باز جریان می‌یابد، نیرویی در جهت حرکت به سطح بستر کانال اثر می‌کند. این نیرو به‌طور ساده نیروی کشش آب در محیط مرطوب است و مقدار آن در واحد سطح، به‌عنوان تنش برشی شناخته می‌شود. تنش برشی با افزایش فاصله از سطح آب افزایش می‌یابد و حداکثر مقدار آن در کف

اطلاعات در خصوص طبیعت توزیع جریان در کانال ساده و مرکب نیازمند حل متغیرهای مسائل هیدرولیک رودخانه‌ها و مسائل مهندسی مانند مفهوم رابطه مقاومت جریان، مکانیسم انتقال رسوب، طراحی کانال پایدار، پوشش کانال‌ها و ... است. محاسبه تنش برشی بستر و دیواره، از دیدگاه تئوریک و از دیدگاه مسائل کاربردی مانند نقش آن

بدون انتقال است؛ ولی با افزایش تدریجی جریان، ذرات به طرف پایین دست شروع به حرکت خواهند کرد. لحظه‌ای که ذرات شروع به حرکت می‌کنند اصطلاحاً آستانه حرکت^۱ نامیده می‌شود. شیلدز^۲ اولین معیار علمی آستانه حرکت را با نمودار ارائه کرد (شکل ۱)

کانال، یعنی جایی که $y=0$ است، اتفاق می‌افتد که به تنش برشی بستر معروف است. در جریان کم، ذرات بستر حرکت ندارند و در محل خود ثابتند. با افزایش شرایط جریان (به‌طور مثال افزایش تنش برشی و یا سرعت جریان) ذرات بستر شروع به حرکت خواهند کرد. این حرکت ابتدا به‌صورت بالا و پایین آمدن ذره



شکل ۱- منحنی شیلدز تعیین تنش بحرانی

Fig. 1- Shields curve determining critical tension

هیدرولیکی روی این کانال‌ها به‌دلیل تأثیر متقابل دشت‌های سیلابی و کانال اصلی به‌مراتب پیچیده‌تر است تا در کانال‌های معمولی. زمانی که عمق جریان در یک کانال طبیعی از عمق کانال اصلی بیشتر می‌شود، دشت‌های سیلابی را که در مجاورت آن قرار دارند، می‌پوشاند و بخشی از جریان در دشت‌های سیلابی حمل می‌گردد. به‌دلیل تفاوت شرایط هیدرولیکی بین دو مقطع (کانال اصلی و دشت‌های سیلابی)، سرعت متوسط در کانال اصلی با سرعت متوسط در دشت‌های سیلابی متفاوت می‌شود. بنابراین، جریان در کانال اصلی با شتاب بیشتری روی دشت‌های سیلابی حرکت می‌کند. این فرآیند باعث انتقال مومنتوم بین جریان در کانال اصلی و دشت‌های سیلابی اطراف خواهد شد. تأثیر متقابل فرآیند مذکور وقتی که جریان روی دشت سیلابی خیلی کم است، نمود بیشتری دارد و رفته‌رفته با افزایش عمق آب روی دشت سیلابی، از

در شکل ۱ محور افقی، عدد رینولدز مرزی و محور عمودی، پارامتر شیلدز است. رابطه عدد رینولدز مرزی به‌صورت رابطه ۱ است:

$$\frac{u_{*c} D_s}{\nu} \quad (1)$$

که در آن،

u_{*c} = سرعت برشی بحرانی؛ D_s = اندازه ذره؛ و ν = لزوجت سینماتیک. رابطه بی‌بعد پارامتر شیلدز به‌صورت رابطه ۲ است:

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) D_s} \quad (2)$$

محل تلاقی دو محور چنانچه در شرایطی بالای خط قرار گیرد، نمایانگر این است که ذرات بستر در حرکت هستند و اگر زیر خط قرار گیرد، نمایانگر این است که ذرات بستر حرکتی ندارند. کانال‌های مرکب شامل یک کانال اصلی عمیق و یک یا دو دشت سیلابی در اطراف آن است که به‌صورت نسبی عمق کمتری نسبت به کانال اصلی دارند. مطالعات

بستر گیاهی و بدون بستر گیاهی را به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند و نتیجه گرفتند که تنش برشی در کانال اصلی به‌دلیل وجود پوشش گیاهی بیشتر است تا در دشت‌های سیلابی. خاتوا و پاترا (Khatua & Patra, 2007) بر اساس نتایج تجربی تنش برشی، توزیع تنش برشی در کانال اصلی و دشت‌های سیلابی را پیش‌بینی کردند. همچنین برای مطالعات تنش برشی، پنج گروه بدون بعد ارائه دادند که مورد تأیید سایر محققان قرار گرفت. دوی و خاتوا (Devi & Khatua, 2017) با استفاده از مدل عددی شیونو و نایت، تنش و پارامترهای هیدرولیکی را تعیین و نتایج قابل قبول با مدل ارائه کردند.

با توجه به توضیحات فوق و اهمیت فرآیند انتقال مومنتوم در کانال‌های مرکب، هدف از این تحقیق، استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و به‌کارگیری یک مدل عددی سه‌بعدی (Ansys Fluent) برای بررسی تنش برشی در کانال مرکب، پروفیل سرعت در دشت‌های سیلابی در سناریوهای مختلف و تعیین سهم تنش برشی در مقاطع مختلف کانال مرکب است.

مواد و روش‌ها

معرفی مدل عددی Ansys Fluent

نرم‌افزار ANSYS FLUENT (یکی از نرم‌افزارهای صنعتی مشهور در زمینه دینامیک سیالات) محاسباتی است که قابلیت‌های فراوانی در تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی دارد. این نرم‌افزار قابلیت مدل‌سازی جریان‌های دوبعدی و سه‌بعدی را داراست. برای استفاده از این نرم‌افزار، ابتدا با یک نرم‌افزار کمکی مانند ANSYS WORKBENCH یا نرم‌افزار AUTOCAD، هندسه

میزان آن کاسته می‌شود. استنباط نادرست از این فرآیند، باعث می‌شود که در طراحی کانال‌های پایدار، میزان دبی واقعی بسیار بیشتر یا بسیار کمتر برآورد شود.

بهادری و بهداروندی‌عسگر (Bahadori & Behdarvandi-Asgar, 2015) با استفاده از مدل عددی 3D Flow تنش برشی را در کانال مرکب مستطیلی بررسی کردند و نتیجه گرفتند افزایش زبری نسبی سبب افزایش تنش برشی و درصد تنش برشی ظاهری می‌شود. ظهیری (Zahiri, 2015) با استفاده از حل عددی مدل شیونو و نایت به روش اجزا محدود، توزیع عرضی سرعت در رودخانه میناب را واسنجی و توزیع عرضی تنش برشی برای سیلاب سال ۱۳۷۴ را شبیه‌سازی کرد و نتیجه گرفت وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری در عرض رودخانه بر اساس تنش‌های برشی به‌دست آمده از مدل ریاضی به واقعیت بسیار نزدیک است.

نجفیان و همکاران (Najafian et al., 2018) با استفاده از مدل عددی 3D Flow و شبیه‌سازی آزمایشگاهی، خصوصیات جریان در کانال منشوری با زبری ناهمگن را شبیه‌سازی کردند و نتیجه گرفتند که افزایش زبری دشت سیلابی سبب کاهش سرعت متوسط و تشدید گرادیان تنش برشی مرزی در محل اتصال مقطع اصلی و دشت سیلابی می‌شود. لین و کارلسون (Lane & Carlson, 1953) با استفاده از نتایج مطالعات میدانی در کانال‌های آبیاری و با استفاده از روش گرادیان سرعت نموداری برای تعیین حداکثر تنش برشی بستر و دیوار در کانال مستطیلی و ذوزنقه‌ای ارائه دادند.

هنسینگ و سانگ (Hyeongsik & Sung, 2005) با استفاده از روش RSM کانال مرکب با

روابط حاکم

رابطه‌های کلی حاکم بر جریان، معادلات پیوستگی و مومنوم ناویر استوکس هستند. معادلات پیوستگی رینولدز به شرح رابطه ۳ و معادلات مومنوم- ناویر استوکس متوسط رینولدزی به صورت رابطه ۴ ارائه شده‌اند (Anderson et al., 1997):

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_j + \bar{\rho}' \bar{u}'_j) = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [(\bar{\rho} + \rho')(\bar{u} + u')] + \frac{\partial}{\partial x} [(\bar{\rho} + \rho')(\bar{u} + u')(u + u')] + (\bar{\rho} + \rho') - \tau_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} [(\bar{\rho} + \rho')(\bar{u} + u')(v' + \bar{v})] \\ + \frac{\partial}{\partial z} [(\bar{\rho} + \rho')(\bar{u} + u')(w' + \bar{w}) - \tau_{zx}] = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

بالادست و پایین دست بر خصوصیات جریان در محل اندازه‌گیری، برابر توصیف تومیناگا و همکاران (Tominaga et al., 1989)، باید خصوصیات جریان در محدوده دو سوم از طول فلوم اندازه‌گیری شود. بنابراین، اندازه‌گیری‌ها در فاصله ۴/۱ متری از ابتدای کانال به طول ۱ متر صورت گرفته است.

شرایط اولیه و شرایط مرزی

شرایط اولیه برای شبیه‌سازی جریان، شامل سرعت متوسط جریان در کانال، ارتفاع زبری کانال و قطر هیدرولیکی است که بر اساس مشخصات مدل آزمایشگاهی و میزان دبی اعمال گردید. مرز ورودی به‌عنوان سرعت ورودی، مرز خروجی به‌عنوان فشار خروجی، مرز بالای کانال به‌عنوان فشار ورودی و دیواره‌ها به برنامه معرفی شدند و همچنین برای جلوگیری از سرریز شدن جریان در کانال، خطای شبیه‌سازی و پیشروی سریع مدل، یک دیواره مجازی در مدل اعمال شد. شکل ۴ شرایط مرزی

جریان مشخص می‌شود و مش‌بندی نیز در ANSYS WORKBENCH صورت می‌گیرد. این نرم‌افزار قابلیت محاسبه را با دقت معمولی و دقت مضاعف دارد و کاربر می‌تواند هر یک را بر اساس نیاز خود انتخاب کند. از فایل‌های خروجی نمودارهای مدل برای مشاهده و بررسی الگوی جریان شبیه‌سازی شده استفاده می‌شود.

مدل $k-\varepsilon$ این مدل بر سه نوع استاندارد^۱، RNG^۲ و Realizable^۳ است. این مدل‌ها دارای دو معادله اضافه بر اساس ε و k هستند. k در این مدل معرف انرژی جنبشی اغتشاش^۴ و ε معرف میزان تلفات انرژی جنبشی اغتشاش^۵ است.

معرفی مدل آزمایشگاهی

اطلاعات به‌کار رفته در حل عددی این تحقیق بر مبنای تحقیق آزمایشگاهی آرمان و فتحی‌مقدم (Arman & Fathi-Moghadam, 2012) و شامل یک کانال مرکب مستطیلی است که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران مدل‌سازی شده است. طول، عرض و ارتفاع فلوم به ترتیب ۸/۳ و ۰/۸ و ۰/۵۵ متر، عرض کانال اصلی ۰/۲ متر و عرض دشت‌های سیلابی ۰/۳ متر است. شکل ۲ نمای شماتیک فلوم آزمایشگاهی و شکل ۳ بخش مورد مطالعه را نشان می‌دهد. برای جلوگیری از تأثیرگذاری شرایط مرزی

1- Standard $k - \varepsilon$ Model

3- Realizable $k - \varepsilon$ Model

5- Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy

2- Renormalization- Group $k - \varepsilon$ Model (RNG)

4- Turbulent Kinetic Energy

شکل‌های^۲ متفاوت است. نسبت عمق آب روی دشت‌های سیلابی به کل عمق جریان به‌عنوان نسبت شکل معرفی شد. به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در سناریوهای مختلف، در تمامی شبیه‌سازی‌ها، عدد فرود ثابت در نظر گرفته شد. بنابراین، در همه شبیه‌سازی‌ها سرعت ورودی ثابت در نظر گرفته شده است.

سناریوها شامل سه دبی متفاوت و دو بستر صاف و بستر زبر هستند. در شکل ۵، نمای شماتیک هندسه کانال مرکب در ۳ نسبت مختلف ارائه شده است. به‌طور کلی ۶ شبیه‌سازی در نظر گرفته شد که خلاصه آنها در جدول ۱ آورده شده است.

به‌کار برده شده در مدل را نمایش می‌دهد. برای شبیه‌سازی زبری، زبری مانینگ مدل آزمایشگاهی با رابطه میر-پیتر و مولر^۱ به ارتفاع زبری تبدیل شد (رابطه ۵).

$$n = \left(\frac{\frac{1}{k_s^6}}{26} \right) \quad (5)$$

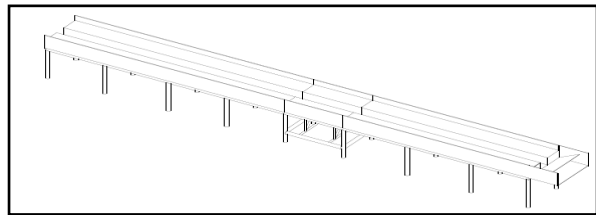
که در آن،

n = ضریب زبری مانینگ و k_s = ارتفاع زبری (متر).

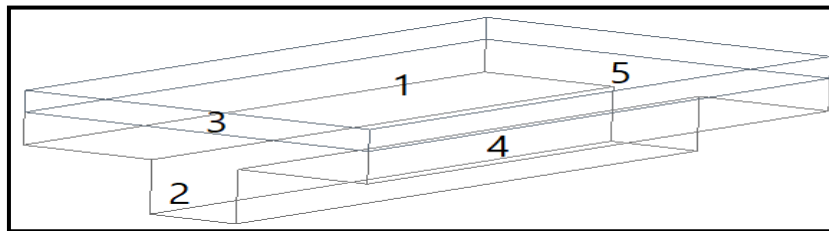
در مدل مورد نظر، سناریوهای شبیه‌سازی متعددی به‌کار برده شده است که شامل نسبت



شکل ۳- نمایی از بخش مورد مطالعه
Fig. 3 - A view of the study section



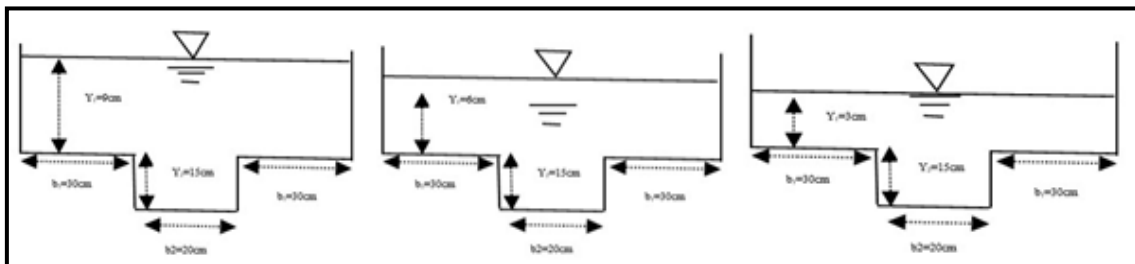
شکل ۲- نمای شماتیک فلوم آزمایشگاهی
Fig. 2- Schematic view of laboratory flume



شکل ۴- نمای شماتیک شرایط مرزی: ۱- فشار ورودی، ۲- سرعت ورودی، ۳- دیواره مجازی، ۴- دیواره، ۵- فشار خروجی

Fig. 4- Schematic view of boundary conditions

1-Pressure inlet, 2- Velocity inlet, 3-Virtual wall, 4-wall, 5- Pressure outlet



شکل ۵- نمای شماتیک سناریوهای شبیه‌سازی

Fig. 5 - Schematic view of simulation scenarios

جدول ۱- سناریوهای شبیه‌سازی

Table 1- Simulation scenarios

دبی (لیتر بر ثانیه) Discharge (lit/s)	نسبت شکل Aspect ratio	عمق کل (سانتی‌متر) Total depth (cm)	بستر Bed	عمق (سانتی‌متر) Depth (cm)
32.18	0.17	18	صاف Smooth	3
32.18			زبر Rough	
46.49	0.29	21	صاف Smooth	6
46.49			زبر Rough	
60.82	0.375	24	صاف Smooth	9
60.82			زبر Rough	

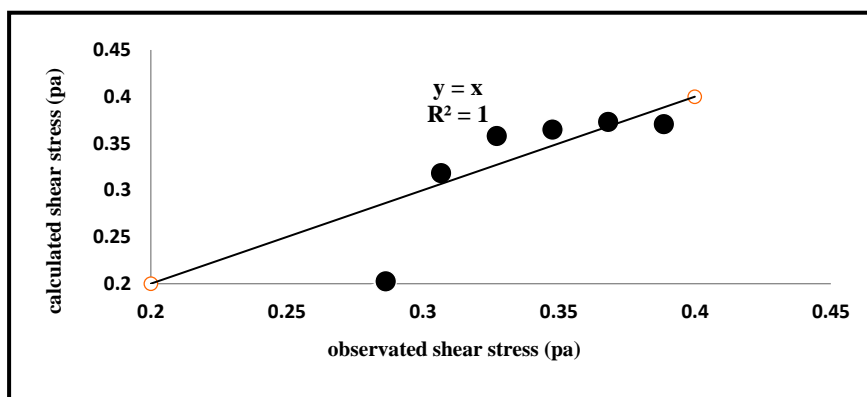
شبکه مش‌بندی ثابت، کانال مورد نظر با مدل‌های مذکور شبیه‌سازی شد که نتایج آن در جدول ۲ و نتایج حاصل از مقایسه تنش‌های مدل عددی و مقادیر آزمایشگاهی در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است.

صحت‌سنجی مدل عددی
صحت‌سنجی مدل آشفتگی
مدل‌های آشفتگی مورد استفاده در تحقیقات مشابه شامل مدل RSM و K-ε هستند. برای معرفی مدل آشفتگی برتر، به‌ازای یک

جدول ۲- مقایسه مدل آشفتگی

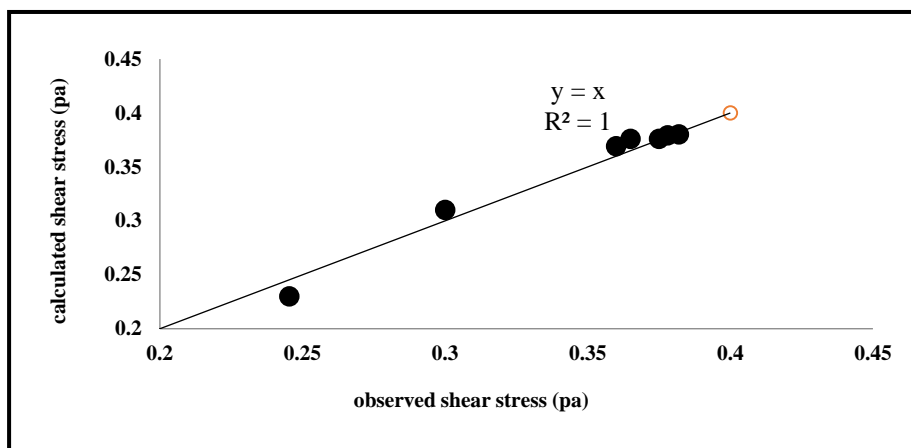
Table 2- Comparison of turbulence model

مدت زمان شبیه‌سازی (ساعت) Simulation time (hour)	MAE	RMSE	مدل Model
72	0.004	0.008	k-ε
150	0.065	0.04	RSM



شکل ۶- مقایسه نتایج حاصل از تنش برشی آزمایشگاهی و عددی با مدل آشفتگی RSM

Fig. 6- Comparison of laboratory and numerical shear stress results with RSM turbulence model



شکل ۷- مقایسه نتایج حاصل از تنش برشی آزمایشگاهی و عددی با مدل آشفتگی k-ε

Fig. 7- Comparison of results of laboratory and numerical shear stress with k-ε turbulence model

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n (|T_o - T_i|)}{n} \quad (7)$$

صحت‌سنجی شبکه مش‌بندی

تشکیل شبکه

درستی و دقت نتایج شبیه‌سازی بستگی به کیفیت شبکه تشکیل شده دارد. به‌منظور افزایش دقت، در نواحی نزدیک به جداره از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شد. برای یافتن شبکه مش‌بندی بهینه، مدل مورد نظر به‌ازای شبکه مش‌بندی درشت، متوسط و ریز و به‌ازای مدل آشفتگی k-ε اجرا گردید که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدت زمان شبیه‌سازی و میزان خطای مدل آشفتگی k-ε کمتر است تا مدل آشفتگی RSM و بنابراین از مدل آشفتگی k-ε به‌عنوان مدل برتر برای ادامه شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. میزان خطای محاسبه شده با پارامترهای آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)^۱ و میانگین مطلق خطا (MAE)^۲ سنجیده شد. برای بررسی صحت مدل، باید میزان پارامتر آماری مذکور به صفر نزدیک باشد. این پارامترها با رابطه‌های ۶ و ۷ قابل محاسبه هستند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(T_o)_i - (T_i)]^2} \quad (6)$$

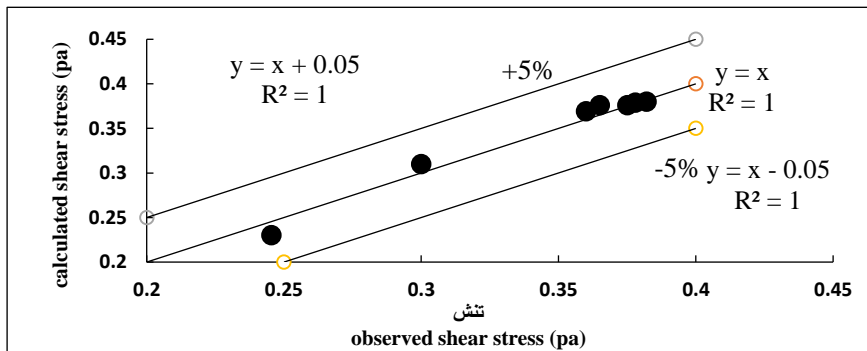
جدول ۳- مقایسه شبکه‌های مش‌بندی مختلف

Table 3- Comparison of different mesh networks

تعداد المان‌ها Number of elements	RMSE	MAE	مدت زمان شبیه‌سازی (ساعت) Simulation time (hours)
300000	0.035	0.017	60
670000	0.008	0.0066	108
798227	0.0066	0.0061	168

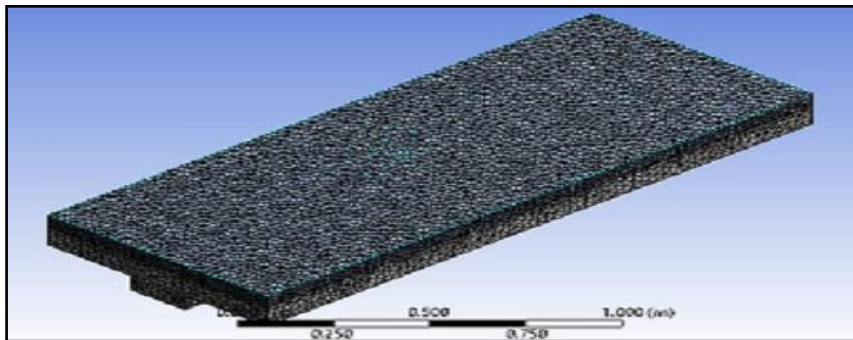
همان‌طور که مشاهده می‌شود، شبکه مش‌بندی متوسط دارای خطای کم و مدت زمان مناسب است. با مقایسه شبکه‌های مش ریز و متوسط، مشخص شد که ریز شدن شبکه و افزایش زمان، تأثیر چندانی بر نتایج ندارد و نتایج مستقل از زمان و اندازه شبکه است. در نتیجه، شبکه مش متوسط به‌عنوان شبکه مش‌بندی بهینه در نظر گرفته شد. شکل ۸، نمودار شبکه مش بهینه در مدل آشفستگی برتر در سطح

معناداری ۹۵ درصد و شکل ۹، شمایی از شبکه به کار رفته در نرم افزار مدل عددی برای مدت زمان ۲۱ ثانیه اجرا شد. برای اطمینان از اتمام شبیه‌سازی، سرعت در چند زمان متفاوت برداشت و مشاهده شد که با گذشت زمان، این پارامترها بی تغییرند و میانگینی ثابت دارند که این موضوع مهم نمایانگر اتمام مدت زمان شبیه‌سازی است. شکل ۱۰ بیانگر این وضعیت است.



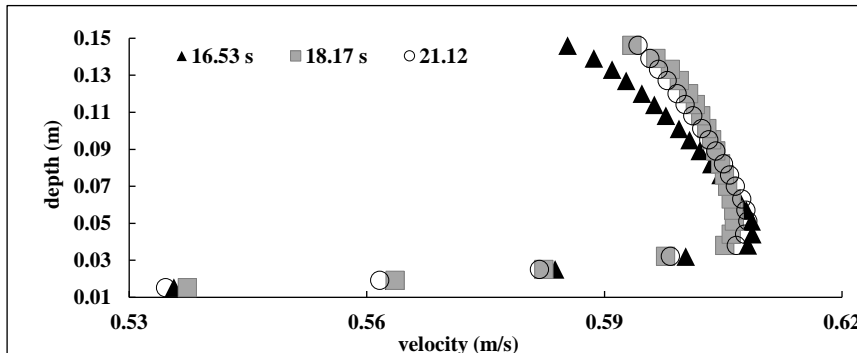
شکل ۸- نمودار شبکه مش بهینه در مدل آشفستگی برتر در سطح معناداری ۹۵ درصد

Fig. 8- Optimum Mesh Network Diagram in Superior Disturbance Model at 95% Significant Level



شکل ۹- شمایی از شبکه به کار رفته در نرم‌افزار

Fig. 9- A grid of software used in the network



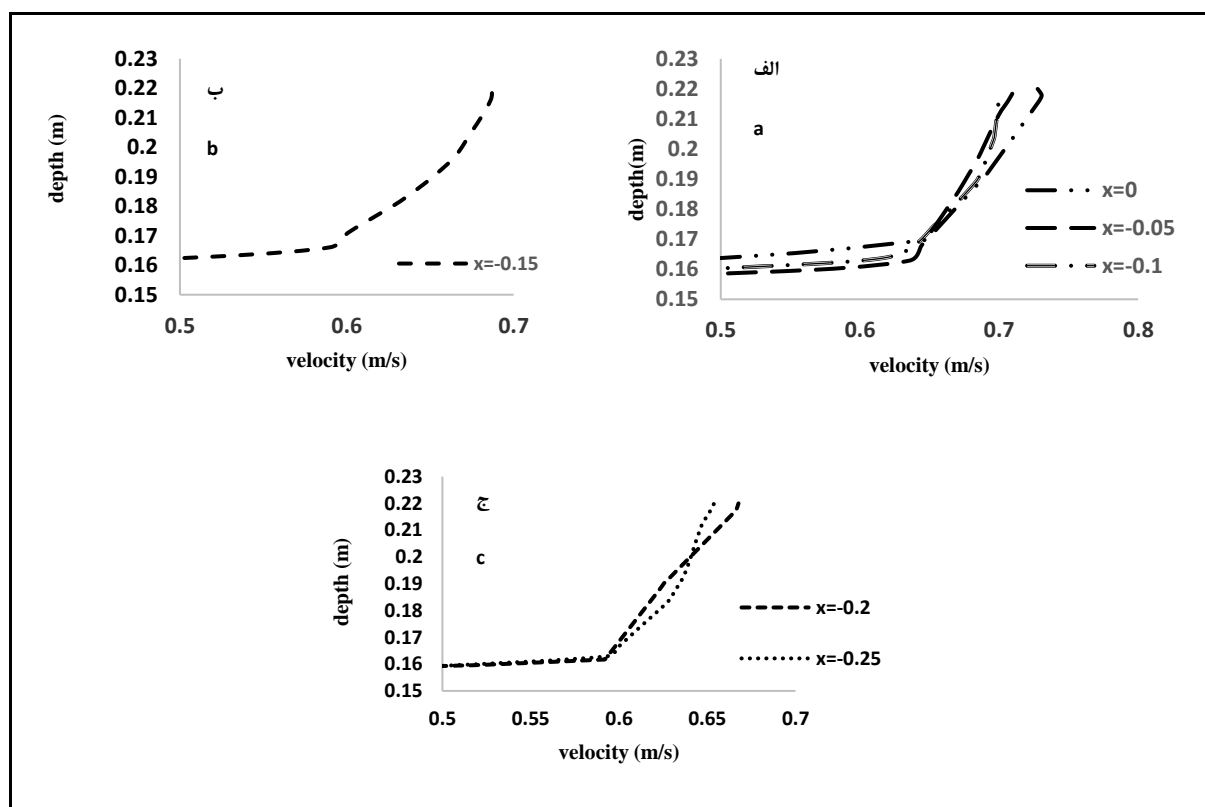
شکل ۱۰- نمودار سرعت در سه مدت زمان متفاوت

Fig. 10- The velocity chart in three different times

نتایج و بحث

تعیین محدوده‌های ناشی از سرعت به‌ازای عمق جریان ۰/۰۹ متر روی دشت سیلابی شکل ۱۱ نشان‌دهنده پروفیل‌های عمقی سرعت در کانال مرکب با بستر صاف با دبی ۶۰/۸۲ لیتر بر ثانیه و عمق آب برابر با ۰/۲۴ متر

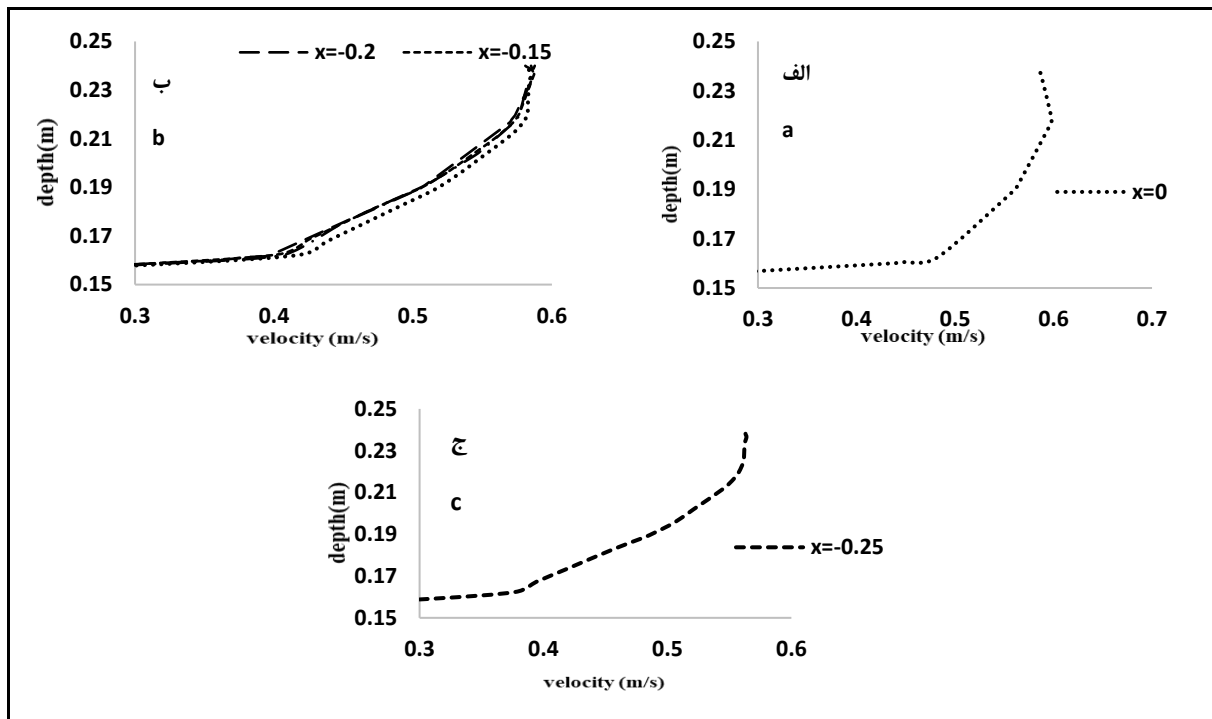
است. در این شکل مشاهده می‌شود که با توجه به نزدیکی متوسط پروفیل‌های عمقی سرعت، دشت سیلابی به سه محدوده مجزا تقسیم بندی شده است: محدوده اول در بازه $0 < x < 0.1$ ، محدوده دوم در بازه $0.1 < x < 0.2$ و محدوده سوم در بازه $0.2 < x < 0.3$.



شکل ۱۱ - پروفیل‌های عمقی سرعت در کانال مرکب با بستر صاف: الف) محدوده اول، ب) محدوده دوم، ج) محدوده سوم
Figure 11- Velocity depth profiles in a compound channel with smooth bed: a) first zone, b) second zone, c) third zone

شکل ۱۲ نشان‌دهنده پروفیل‌های عمقی سرعت در کانال مرکب با بستر زیر و دبی جریان برابر با ۶۰/۸۲ لیتر بر ثانیه و عمق آب برابر با ۰/۲۴ متر است. با توجه به نزدیکی متوسط پروفیل‌های عمقی

سرعت، دشت سیلابی به سه محدوده مجزا تقسیم بندی شده است: محدوده اول در بازه $0 < x < 0.05$ ، محدوده دوم در بازه $0.05 < x < 0.25$ و محدوده سوم در بازه $0.25 < x < 0.3$.



شکل ۱۲- پروفیل‌های عمقی سرعت در کانال مرکب با بستر زبر: الف) محدوده اول، ب) محدوده دوم، ج) محدوده سوم

Fig. 12- Velocity depth profiles in a compound channel with rough bed: a) first zone, b) second zone, c) third zone

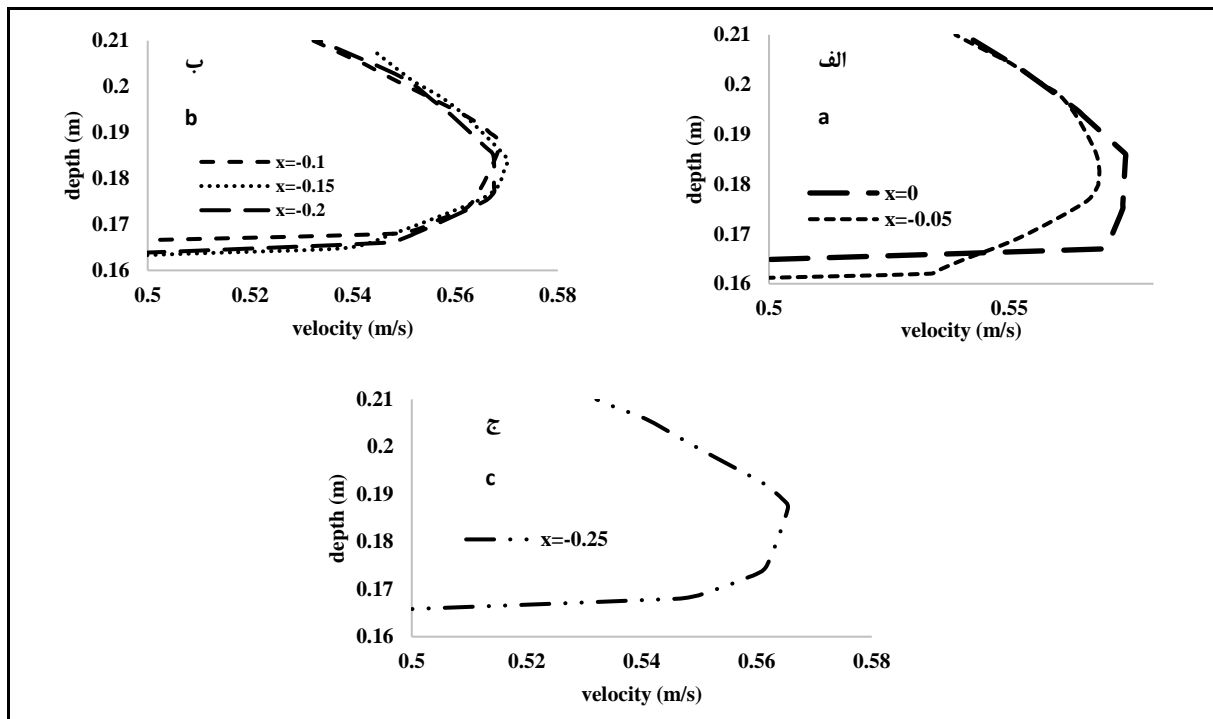
$$-0.3 < X < -0.25$$

شکل ۱۴ نشان‌دهنده پروفیل‌های عمقی سرعت در کانال مرکب با بستر زبر و دبی جریان برابر با ۴۶/۴۹ لیتر بر ثانیه و عمق آب برابر با ۰/۲۱ متر است. با توجه به نزدیکی متوسط پروفیل‌های عمقی سرعت، دشت سیلابی به سه محدوده مجزا تقسیم بندی شده است: محدوده اول در بازه $-0.05 < X < 0$ ، محدوده دوم در بازه $-0.25 < X < -0.05$ و محدوده سوم در بازه $-0.3 < X < -0.25$.

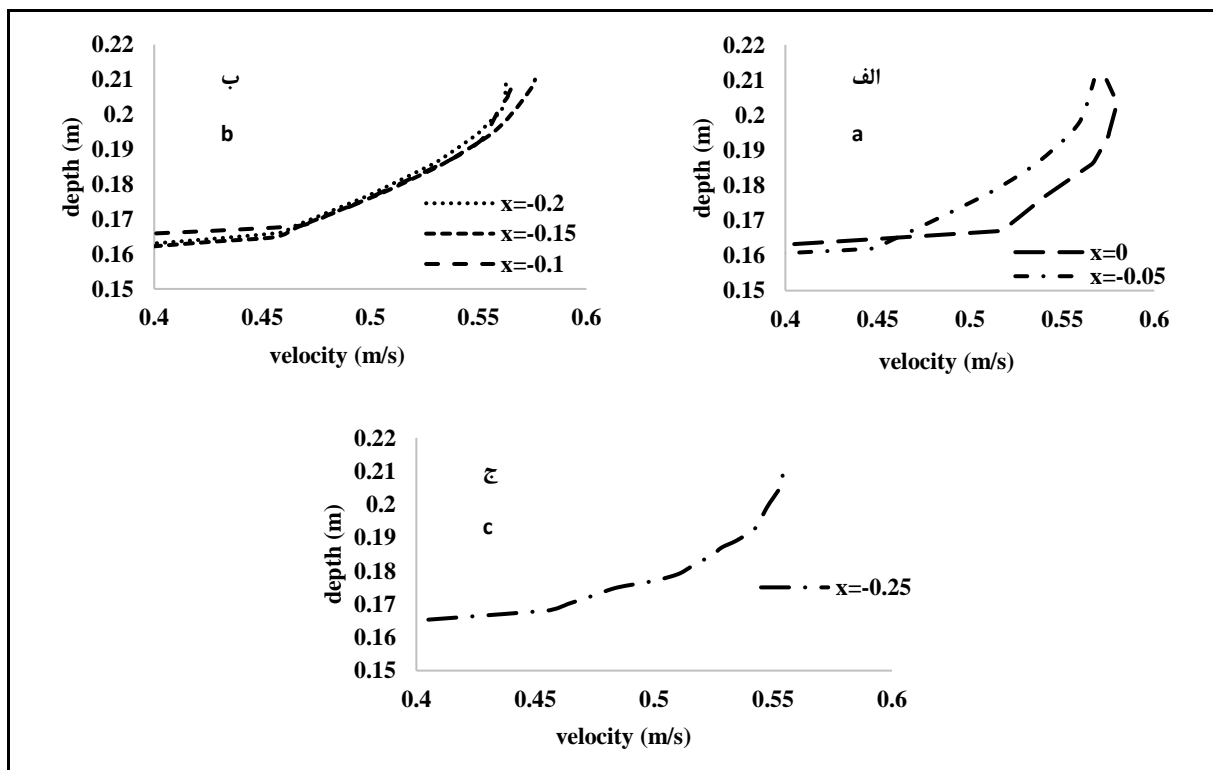
تعیین محدوده‌های ناشی از سرعت به‌ازای عمق

جریان ۰/۰۶ متر روی دشت سیلابی

شکل ۱۳ نشان‌دهنده پروفیل‌های عمقی سرعت در کانال مرکب با بستر صاف و دبی جریان ۶/۴۹ لیتر بر ثانیه و عمق آب ۰/۲۱ متر است. با توجه به نزدیکی متوسط پروفیل‌های عمقی سرعت، دشت سیلابی به سه محدوده تقسیم‌بندی شده است: محدوده اول در بازه $-0.05 < X < 0$ ، محدوده دوم در بازه $-0.25 < X < -0.05$ و محدوده سوم در بازه



شکل ۱۳- پروفیل‌های عمقی سرعت در کانال مرکب با بستر صاف: الف) محدوده اول، ب) محدوده دوم، ج) محدوده سوم
 Fig. 13- Velocity depth profiles in a compound channel with smooth bed: a) first zone, b) second zone, c) third zone

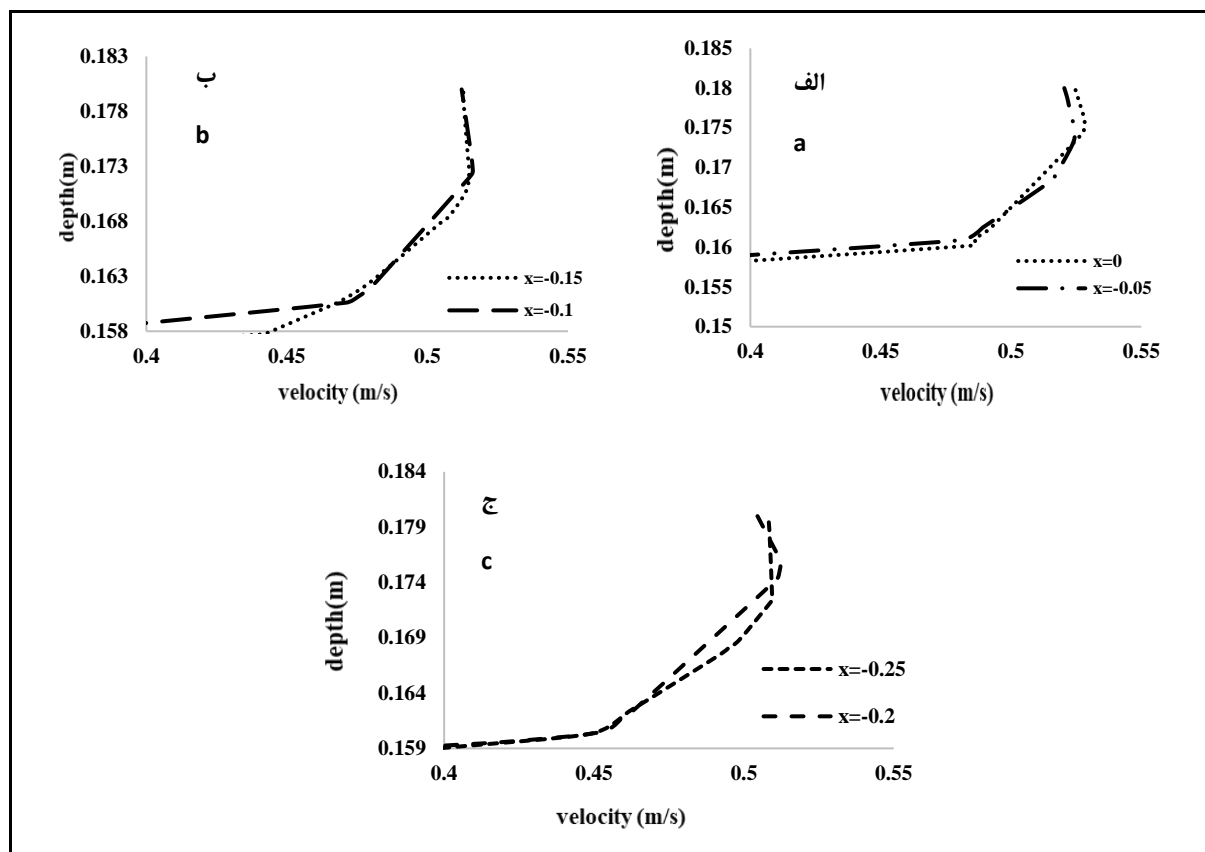


شکل ۱۴- پروفیل‌های عمقی سرعت در کانال مرکب با بستر زبر: الف) محدوده اول، ب) محدوده دوم، ج) محدوده سوم
 Fig. 14- Velocity depth profiles in a compound channel with rough bed: a) first zone, b) second zone, c) third zone

است. با توجه به نزدیکی متوسط پروفیل‌های عمقی سرعت، دشت سیلابی به سه محدوده مجزا تقسیم بندی شده است: محدوده اول در بازه $0 < x < 0.05$ ، محدوده دوم در بازه $0.05 < x < 0.2$ و محدوده سوم در بازه $0.2 < x < 0.3$.

تعیین محدوده‌های ناشی از سرعت به‌ازای عمق جریان 0.03 متر روی دشت سیلابی

شکل ۱۵ نشان‌دهنده پروفیل‌های عمقی سرعت در کانال مرکب با بسترساف و دبی جریان برابر با $32/18$ لیتر بر ثانیه و عمق آب برابر با 0.18 متر



شکل ۱۵- پروفیل‌های عمقی سرعت در کانال مرکب با بسترساف: الف) محدوده اول، ب) محدوده دوم، ج) محدوده سوم
Fig. 15- Velocity depth profiles in a compound channel with smooth bed: a) first zone, b) second zone, c) third zone

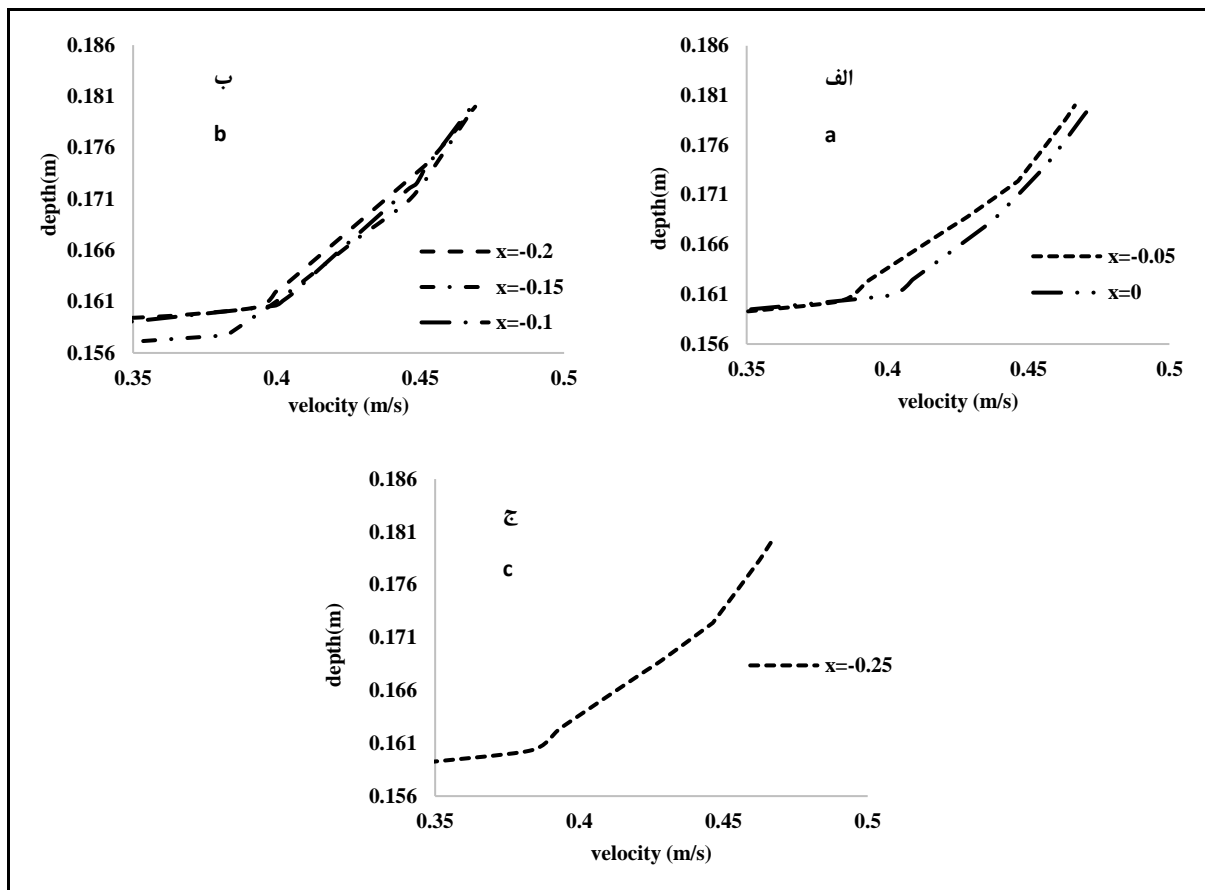
در نمودارهای ۱۱ تا ۱۶ مشاهده می‌شود که با افزایش دبی، جریان از کانال اصلی به سمت دشت سیلابی با قدرت کمتری سرازیر می‌شود و کاهش عمق کانال اصلی سبب افزایش تأثیر جریان از کانال اصلی به سمت دشت سیلابی می‌شود. نتایج آزمایش‌های تومیناگا و نزو (Tominaga & Nezu, 1991) نیز بیانگر این مطلب است. شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ پروفیل تنش برشی در

شکل ۱۶ نشان‌دهنده پروفیل‌های عمقی سرعت در کانال مرکب با بسترساف و دبی جریان برابر با $32/18$ لیتر بر ثانیه و عمق آب برابر با 0.18 متر است. با توجه به نزدیکی متوسط پروفیل‌های عمقی سرعت، دشت سیلابی به سه محدوده مجزا تقسیم‌بندی شده است: محدوده اول در بازه $0 < x < 0.05$ ، محدوده دوم در بازه $0.05 < x < 0.2$ و محدوده سوم در بازه $0.2 < x < 0.3$.

شبیه‌سازی سه‌بعدی تنش برشی در کانال...

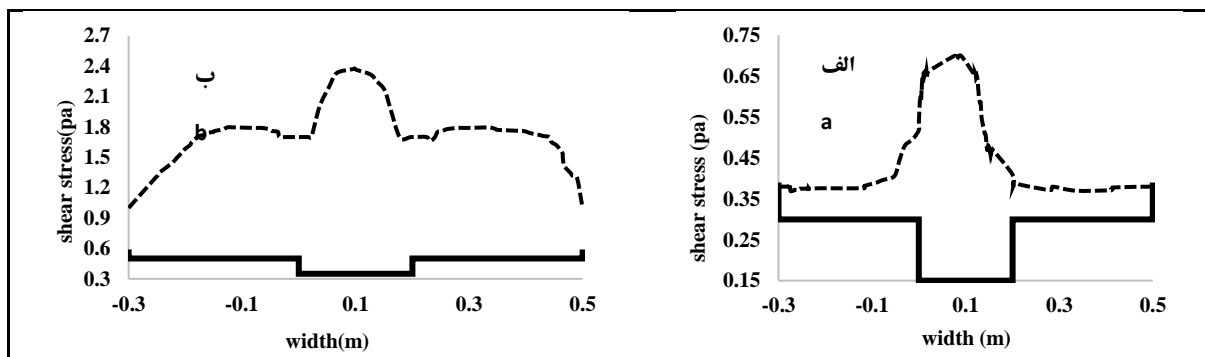
تنش برشی در نمودارهای بستر صاف افزایش یافته است. با افزایش عمق جریان، میزان تنش برشی کاهش می‌یابد.

سناریوهای شبیه‌سازی را نشان می‌دهند. با توجه به این نمودارها می‌توان گفت که تنش برشی در نمودارهای بستر زبر، به‌طور چشمگیر نسبت به میزان



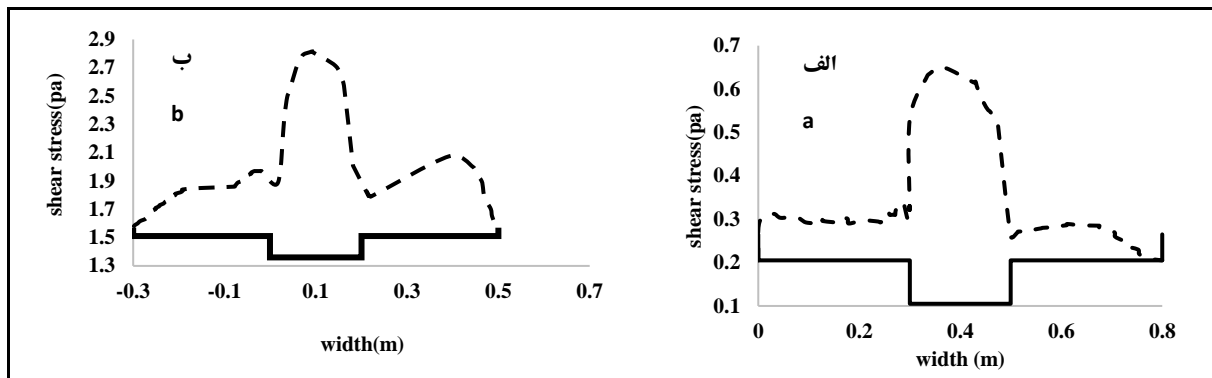
شکل ۱۶- پروفیل‌های عمقی سرعت در کانال مرکب با بسترزبر: الف) محدوده اول، ب) محدوده دوم، ج) محدوده سوم

Fig. 16- Velocity depth profiles in a compound channel with rough bed: a) first zone, b) second zone, c) third zone

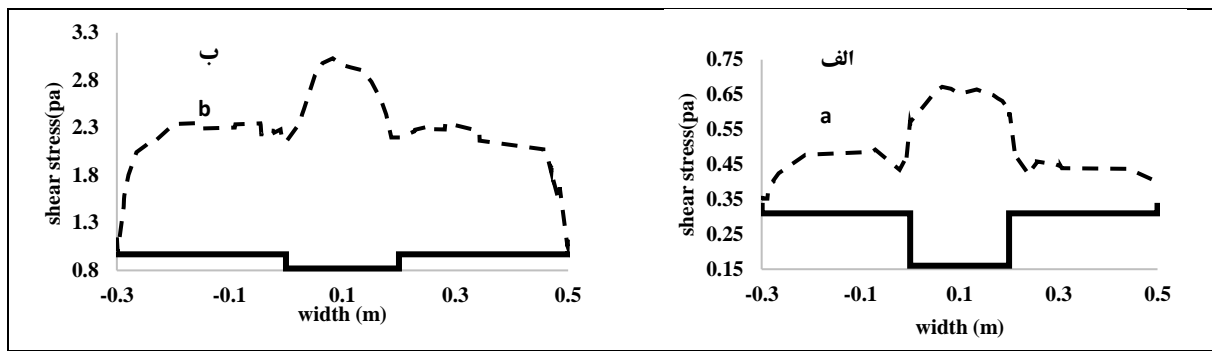


شکل ۱۷- نمودار تنش برشی در کانال مرکب به‌ازای عمق آب ۰/۰۹ متر روی دشت سیلابی: الف) بستر صاف، ب) بستر زبر

Fig. 17- Shear stress in the compound channel for depth of 0.09 m on flood plain: a) smooth bed; b) rough bed



شکل ۱۸ - نمودار تنش برشی در کانال مرکب به‌ازای عمق آب ۰/۰۶ متر روی دشت سیلابی: الف) بستر صاف، ب) بستر زبر
 Fig. 18- Shear stress in the compound channel for depth of 0.06 m on flood plain: a) smooth bed; b) rough bed



شکل ۱۹ - نمودار تنش برشی در کانال مرکب به‌ازای عمق آب ۰/۰۳ متر روی دشت سیلابی: الف) بستر صاف، ب) بستر زبر
 Fig. 19- Shear stress in the compound channel for depth of 0.03 m on flood plain: a) smooth bed; b) rough bed

سیلابی از ۵۶/۱۵ به ۵۴/۵ درصد و در کانال اصلی از ۴۴ به ۴۵ درصد تغییر یافته است.

جدول ۵ نشان می‌دهد که با کاهش عمق در دشت‌های سیلابی، درصد تنش برشی در دشت‌های سیلابی افزایش و در کانال اصلی کاهش می‌یابد؛ با افزایش عمق از ۳ سانتی‌متر به ۶ سانتی‌متر، درصد تنش برشی در دشت‌های سیلابی از ۶۳ به ۵۸ درصد و در کانال اصلی از ۳۷ به ۴۲ درصد تغییر یافته است. از عمق ۶ سانتی‌متر به ۹ سانتی‌متر، درصد تنش برشی در دشت‌های سیلابی از ۵۸ به ۵۵ درصد و در کانال اصلی از ۴۲ به ۴۴ درصد تغییر یافته است. علاوه بر این، از دو جدول فوق نتیجه‌گیری می‌شود که با افزایش زبری، میزان تنش برشی افزایش می‌یابد؛ در عمق ۳ سانتی‌متر، میزان

سهم تنش برشی دشت‌های سیلابی و کانال اصلی در سناریوهای مختلف

پس از محاسبه تنش برشی در کانال مرکب و رسم نمودارهای مربوطه، این بخش به تفکیک سهم تنش برشی در کانال و دشت‌های سیلابی اطراف پرداخته می‌شود که نتایج آن در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. جدول ۵ نشان می‌دهد که با کاهش عمق، در دشت‌های سیلابی، درصد تنش برشی در دشت‌های سیلابی افزایش و در کانال اصلی کاهش می‌یابد؛ از عمق ۳ سانتی‌متر به ۶ سانتی‌متر، درصد تنش برشی در دشت‌های سیلابی از ۶۱ به ۵۶/۱۵ درصد و در کانال اصلی از ۳۹/۲ به ۴۴ درصد تغییر یافته است. از عمق ۶ سانتی‌متر به ۹ سانتی‌متر، درصد تنش برشی در دشت‌های

تنش برشی کل در بستر صاف ۱/۴۸ و در بستر زبر سیلابی با بستر صاف ۶۱ و در دشت‌های سیلابی با ۶/۷ پاسکال و درصد تنش برشی در دشت‌های بستر زبر ۶۳ درصد است.

جدول ۴- اطلاعات مربوط به شرایط بستر صاف

Table 4- Information of smooth bed conditions

سهم تنش برشی (درصد) Contribution of shear stress (%)	تنش کل (پاسکال) Total shear (Pa)	تنش برشی (پاسکال) Shear stress (Pa)	دبی (لیتر بر ثانیه) Discharge (lit/s)	مقطع Section	عمق (سانتی‌متر) Depth (cm)
61	1.48	0.9	32.18	دشت سیلابی Flood plain	3
39.2		0.58		کانال اصلی Main channel	
56.15	1.3	0.73	46.49	دشت سیلابی Flood plain	6
44		0.57		کانال اصلی Main channel	
54.5	1.27	0.693	60.82	دشت سیلابی Flood plain	9
45		0.576		کانال اصلی Main channel	

جدول ۵ - اطلاعات مربوط به شرایط بستر زبر

Table 5- Information on rough bed conditions

سهم تنش برشی (درصد) Contribution of shear stress (%)	تنش کل (پاسکال) Total shear (Pa)	تنش برشی (پاسکال) Shear stress (Pa)	دبی (لیتر بر ثانیه) Discharge (lit/s)	مقطع Section	عمق (سانتی‌متر) Depth (cm)
63	6.7	4.21	32.18	دشت سیلابی Flood plain	3
37		2.49		کانال اصلی Main channel	
58	5.59	3.22	46.49	دشت سیلابی Flood plain	6
42		2.36		کانال اصلی Main channel	
55	5.16	2.86	60.82	دشت سیلابی Flood plain	9
44		2.3		کانال اصلی Main channel	

نتیجه‌گیری

k-ε از مدل آشفتگی RSM دقت بالاتری دارد. در مرحله بعد برای سه شکل مختلف برای حالت‌های بستر صاف و بستر زبر، مدل عددی اجرا شد. نتایج نشان می‌دهد که کاهش عمق آب روی دشت‌های سیلابی سبب افزایش تأثیر جریان از کانال اصلی به سمت دشت سیلابی می‌شود. با

در این تحقیق با استفاده از مدل عددی Ansys Fluent، سهم تنش برشی در کانال اصلی و دشت‌های سیلابی کانال مرکب مستطیلی بررسی شده است. نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل آشفتگی

کاهش عمق در دشت‌های سیلابی، میزان و درصد تنش برشی در دشت‌های سیلابی افزایش و در کانال اصلی کاهش می‌یابد، به طوری که در بستر صاف از عمق ۳ سانتی‌متر به ۶ سانتی‌متر، تنش برشی در دشت‌های سیلابی از ۶۱ به ۵۶/۱۵ درصد و در کانال اصلی از ۳۹/۲ به ۴۴ درصد تغییر یافته است. در بستر زیر، از عمق ۳ سانتی‌متر به ۶ سانتی‌متر، تنش برشی در دشت‌های سیلابی از ۶۳ به ۵۸ درصد و در کانال اصلی از ۳۷ به ۴۲ درصد تغییر یافته است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که با افزایش زیری، میزان تنش برشی افزایش می‌یابد، به طوری که در عمق ۳ سانتی‌متر، میزان تنش برشی کل در بستر صاف ۱/۴۸ و در بستر زیر ۶/۷ پاسکال و درصد تنش برشی در دشت‌های سیلابی با بستر صاف ۶۱ و در دشت‌های سیلابی با بستر زیر ۶۳ درصد می‌باشد.

مراجع

- Arman, A. and Fathi-Moghadam, M. 2012. Investigation of shear stress variations in rectangular channel section. *J. Irrig. Sci. Eng.* 36(3): 55-66. (in Persian)
- Anderson, A., Tannehill, J. and Pletcher, R. 1997. *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*. Taylor and Francis Publishers, London, UK.
- Bahadori, S. and Behdarvandi-Asgar, M. 2015. The effect of relative roughness on shear stress and apparent shear stress in a direct symmetric rectangular composite channel. *J. Water Eng.* 3(2): 111-118. (in Persian)
- Devi, K. and Khatua, K. 2017. Depth-averaged velocity and boundary shear stress prediction in asymmetric compound channels. *Arab. J. Sci. Eng.* 42(9): 3849-3862.
- Hyeongsik, K. and Sung, U. 2005. 3D numerical simulation of compound open-channel flow with vegetated floodplains by reynolds stress model. *KSCE J. Civil Eng.* 9(1): 7-11.
- Khatua, K. and Patra, K. 2007. Boundary shear stress distribution in meandering compound channel flow. *Proceedings of the 5th Australian Stream Management Conference*. Australian Rivers: Making a Difference. May 21. Charles Sturt University, Thurgoona, New South Wales.
- Lane, E. W. and Carlson, E. J. 1953. Some factors affecting the stability of canals constructed in coarse granular materials. *Proceedings of the IAHR 5th Congress*. Sep. 1-4. Minneapolis, USA.
- Najafian, S., Younesi, H. and Parsaee, A. 2018. Numerical and physical modeling of flow characteristics in a prismatic compound channel with inhomogeneous roughness. *J. Eng. Res. Water Drain. Struct.* 18(68): 1-16. (in Persian)
- Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K. and Nakagawa, H. 1989. Three dimensional turbulent structure in straight open channel flows. *J. Hydraul. Res.* 27(11): 149-173.

شبیه‌سازی سه‌بعدی تنش برشی در کانال...

- Tominaga, A. and Nezu, I. 1991. Turbulent structure in compound open channel flows. J. Hydraul. Eng. 117(1): 21-41.
- Zahiri, A. 2015. Flow analysis across the river using finite elements. J. Water Soil Sci. 26(2): 229-241. (in Persian)

3D Numerical Simulation of Shear Stress in Rectangular Compound Channel using Ansys Fluent Model

R. Valizadeh and A. Arman*

* Corresponding Author: Assistant Professor, Water Engineering Department, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: a.arman@razi.ac.ir

Received: 3 July 2018, Accepted: 21 October 2018

Abstract

The precise prediction of shear stress in open channel is important in many engineering issues such as designing of sustainable channels, calculation of energy losses, and sedimentation in channels. In flood duration, due to difference in depth of flow between the main channel and the flood plains surrounding the flow, the flow velocity is also different, and subsequently the stress and distribution of stress significantly changes. In this paper, it has been shown the performance of the Ansys Fluent three-dimensional numerical model in simulating various hydraulic parameters for a rectangular compound channel with smooth and rough bed and wall. Comparison of shear stress values showed that with decreasing depth in flood plains, the amount and percentage of shear stress in flood walls, and in main channel increased and decreased respectively, and also it was shown that with increasing roughness, shear stress increased. Results also indicated that with increasing flow rate, the power flow increased and velocity and vortices were formed at the intersection of flood plains and main channels. The results of this research can play a role in designing of sustainable channels, especially at the intersection of the main channel and flood walls.

Keywords: Flood Plain, Main Channel, Open Channel