

شبیه‌سازی عددی تاثیر شکل بستر بر ساختار جریان در رودخانه‌های کم عمق

محمد شریفی^۱، حسین قریشی نجف آبادی^۲، محمدرضا مجدزاده طباطبائی^{۳*}، سعید بهشتی^۴

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید بهشتی

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید بهشتی

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید بهشتی

۴- مربی گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید بهشتی

m_majdzadeh@sbu.ac.ir

تاریخ پذیرش ۹۹/۰۳/۲۱

تاریخ دریافت ۹۸/۰۸/۰۹

چکیده

بیشتر رودخانه‌ها دارای بسترهای ناهموار هستند که به آن‌ها شکل‌های بستر گفته می‌شود. این شکل‌ها بسته به شرایط هیدرولیکی انواع متفاوتی دارند که باعث ایجاد مقاومت در جریان می‌شوند. با وجود سال‌ها پژوهش و آزمایش در مورد شکل‌های بستر هنوز معادله دقیق و جامعی برای پیش‌بینی هندسه شکل‌های بستر رودخانه و برهم‌کنش آن با جریان به دست نیامده است. در این پژوهش با هدف بررسی تاثیر هندسه تلماسه بر ساختار جریان، به شبیه‌سازی عددی حرکت جریان روی تلماسه‌ها در مجرای کانال باز پرداخته شد. در همین راستا تعداد ۲۹ شبیه‌سازی برای مطالعه تاثیر هندسه پنج نوع تلماسه با زوایا و ارتفاع‌های متفاوت در شرایط هیدرولیکی مختلف و زبری‌های کف گوناگون انجام گردید. به دلیل ضعف مدل آشفتگی RANS در پیش‌بینی جدایش شدید جریان در این پژوهش از مدل آشفتگی DES برای تلماسه‌های بزرگ مقیاس و برای شبیه‌سازی مدل عددی از نرم‌افزار STAR-CCM+ استفاده شده است. جهت بررسی صحت شبیه‌سازی‌ها، نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی محققین پیشین مقایسه شد که نشان از دقت خوب مدل عددی دارد. در نهایت فرمولی برای پیش‌بینی این برهم‌کنش حاصل شد. نتایج ارزیابی رابطه به دست آمده برای بررسی تاثیر هندسه تلماسه بر هیدرولیک جریان، نشان داد که رابطه ارائه شده با خطای ۱۱،۲۵٪ و $R^2 = ۰،۸۶$ ، با توجه به طبیعت کاملاً تصادفی تشکیل شکل بستر، دقت خوبی دارد.

واژه‌های کلیدی: شکل بستر، تلماسه، تحلیل ابعادی، مقاومت جریان، شبیه‌سازی عددی، STAR-CCM+.

۱- مقدمه

زبری دانه و زبری شکل متوجه تاثیر قابل توجه اثر شکل بستر بر ساختار جریان شده‌اند. تلماسه‌ها با ایجاد جدایش جریان و لایه‌های مختلف جریان، باعث تغییر در روند انتقال رسوب و تغییر مورفولوژی رودخانه می‌شود. تعیین و اندازه‌گیری جریان‌های دورانی بسیار نزدیک به بستر و نیز نمایش ساختار آشفتگی جریان عبوری روی شکل‌های بستر در جریان‌های

اغلب، مهندسی آب و رودخانه ضریب زبری بستر را به ویژگی‌های فیزیکی سنگ دانه‌ها ارتباط داده‌اند [1]. بنابراین ضریب زبری معادل بستر به صورت ضریبی از قطر معادل که درصد معینی از سنگ دانه‌ها از آن ریزتر است (مانند d_{15} ، d_{50} ، d_{84}) ارائه می‌شود. پژوهشگران با تفکیک زبری کل به

مقاومت جریان ارائه دادند و آن را با تعداد زیادی داده‌های میدانی درستی‌آزمایی کردند. براساس نتایج معادله ارائه شده نسبت به معادلات پژوهشگران گذشته مانند مانینگ، حساسیت بیشتری نسبت به شکل بستر نشان می‌دهد [10].

استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی برای بررسی تاثیر شکل بستر بر ساختار جریان، هزینه‌بر و زمان‌بر و نیازمند نیروی انسانی است. استفاده از مدل‌های عددی می‌تواند به افزایش دقت و کاهش زمان و هزینه‌های مطالعات جریان بینجامد. پارلبرگ و دومن برای پیش‌بینی توسعه تلماسه‌ها مدلی را معرفی کردند که قادر به مدل کردن رسوب و جریان عبوری از روی تلماسه‌ها و پیش‌بینی ناحیه جدایی جریان است. نتایج حاصل نشان داد جدایش جریان در تلماسه‌هایی با زاویه ملایم پایین دست، تشکیل نمی‌شود [11]. تیجری و فردسو به بررسی عددی شکل و ابعاد تلماسه‌های تشکیل شده در بسترهای فرسایش پذیر پرداختند. آن‌ها از یک مدل $k - \epsilon$ برای توصیف انتقال رسوب و معادله پیوستگی استفاده کردند و دریافتند که بیشینه ارتفاع تلماسه در محل ماکزیمم انتقال رسوب رخ می‌دهد [12]. یو و همکاران از LES برای مطالعه جریان کانال باز با عدد رینولدز بالا روی یک قطار از ۲۲ تلماسه که در یک فلوم هیدرولیکی قرار داشتند، برای بررسی ساختارهای جریان غیر دایمی و همچنین اطلاعات میانگین جریان و آمار آشفتگی استفاده کردند. نتایج نشان داد که LES را می‌توان برای کشف ساختارهای منسجم در جریان‌های آشفته روی تپه‌های ماسه‌ای استفاده کرد. این آزمایش نشان می‌دهد که جریان به دو قسمت تقسیم شده که لایه داخلی تحت تاثیر هندسه تلماسه است و حدود ۲ تا ۳ برابر ارتفاع تلماسه ضخامت دارد و لایه بیرونی خارج از تاثیر هندسه تلماسه است [13]. معتمدی و همکاران در مطالعات جامع آزمایشگاهی و عددی طول ناحیه جدایی و همچنین برهم‌کنش هندسه تلماسه بر ساختار جریان را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش سرعت جریان، ارتفاع تلماسه، اندازه ذرات بستر و کاهش عمق جریان موجب افزایش طول ناحیه جدایی جریان می‌شود [14]. عباسپور و کیا جریان عبوری روی موانع استوانه‌ای شکل به عنوان پوشش گیاهی در کف کانال را با مدل عددی شبیه‌سازی کردند. از اهداف این پژوهش

طبیعی به دلیل محدودیت‌های وسایل اندازه‌گیری دشوار است. به همین دلیل عمده مطالعات جریان‌های آشفته روی تلماسه‌های ثابت و در محیط آزمایشگاه انجام گرفته است.

عبارت تلماسه نخستین بار توسط گیلبرت مطرح شد [2]. به نظر سولزی، امواج ماسه‌ای عموماً توسط یک سطح مقطع مثلثی شکل و نامتقارن با زاویه تند پایین دست ۲۸ تا ۳۵ درجه و زاویه کم بالادست حدود ۵ درجه معین می‌شوند. تلماسه‌ها موجب تشکیل ناحیه بزرگی از جدایی خطوط جریان در پایین دست خود می‌شوند. در این منطقه جریان گردابی ایجاد می‌شود که باعث اتلاف انرژی زیادی خواهد شد. اندازه‌گیری سرعت در این ناحیه بیانگر این است که سرعت در این ناحیه تقریباً یک دوم الی یک سوم سرعت متوسط جریان در جهت بالادست است [3].

انگلاند و هانسن (به نقل از تیلوسماند و همکاران [4]) به این نتیجه رسیدند که از میان شکل‌های بستر، تلماسه بیشترین مقاومت را در جریان ایجاد می‌کند [5]. ون راین (به نقل از رایزبوشلر و همکاران [6]) در مطالعه خود روی شکل‌های بستر، نموداری ارائه نمود که به عقیده پژوهشگران معتبرترین نمودار برای رژیم جریان انتقالی و پایینی است [7]. بالاچاندرا و پاتل به بررسی جریان روی تلماسه‌های ثابت پرداختند. آن‌ها آزمایش‌هایی برای به دست آوردن اطلاعات دقیق در مورد جریان روی سلسله‌ای از تلماسه‌های دو بعدی ثابت انجام دادند که این امر باعث شناخت ساختارهای جریانی که نقشی حیاتی در انتقال رسوب ایفا می‌کنند، می‌شود. نتایج نشان داد که شکل تلماسه‌ها تاثیر زیادی بر ویژگی‌های جریان دارد. با این حال، به نظر می‌رسد طول گردابه‌های ناحیه جدایی جریان تحت تاثیر زبری نزدیک بستر قرار می‌گیرد [8]. وندتی ساختار جریان را شکل‌های دو بعدی و سه بعدی بستر (با حالت‌های متفاوت تاج تلماسه) مقایسه کرد. نتایج نشان داد که محاسبه مقاومت جریان در کانال‌های باز نیاز به مطالعه شکل تاج شکل‌های بستر دارد، زیرا در بسترهای با اندازه یکسان، شکل‌های متفاوت می‌توانند مقادیر مختلفی از مقاومت جریان را تولید کنند [9]. شیپا و همکاران به بررسی نقش تلماسه‌ها بر مقاومت جریان رودخانه‌های آبرفتی پرداختند، آن‌ها معادله‌ای برای برآورد

عمق انجام گرفته است، علت این امر آن است که در جریانات کم عمق اثر تلماسه روی جریان مشهود است، ولی با افزایش عمق، تاثیر شکل بستر و زبری کف بر ساختار جریان کاهش می‌یابد [19]، به طوری که در جریانات عمیق، تاثیر تلماسه‌های کف رودخانه به مانند زبری ذره عمل می‌کند و جدایش جریان در پایین دست تلماسه‌ها تشکیل نمی‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معادلات حاکم

در جریان‌های آشفته سه‌بعدی در کانال‌های باز برای سیال غیر قابل تراکم نیوتنی معادلات پیوستگی و مومنتوم با استفاده از تنسور کارتیزین به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial (\tau_{ij}^v + \tau_{ij}^t)}{\partial x_j} \quad (2)$$

از جمله معادلات ناویر-استوکس معادله رینولدز است که به نام RANS گفته می‌شود در این معادله سرعت، x مکان، t زمان، \bar{u}_j اندیس‌های کارتیزین بوده که ۱ برای جهت جریان، ۲ برای جریان در جهت عرض و ۳ در جهت قائم استفاده می‌شود. P برای فشار، ρ برای جرم مخصوص بوده و $\bar{f}_i = g \delta_{i3}$ که در آن g شتاب ثقل و δ_{i3} دلتای کرونکر می‌باشد. τ_{ij}^v تنش برشی ناشی از لزجت سیال و τ_{ij}^t تنش برشی ناشی از توربولانس است.

در این روابط علامت پریم نشان دهنده نوسانات سرعت و علامت بار نشان دهنده متوسط زمانی است.

$$\tau_{ij}^v = \rho \nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$\tau_{ij}^t = -\rho \overline{u'_i u'_j} \quad (4)$$

سمت چپ معادله (۳) و (۴) بیان کننده تغییرات میانگین مومنتوم ناشی از غیر دائمی بودن جریان و شتاب‌های جابه‌جایی است.

بررسی تاثیر زبری‌های گوناگون روی لایه مرزی آشفته‌گی در جریان‌های با عدد رینولدز بالا بود. مشاهدات آن‌ها حاکی از آن است که نتایج مدل RNG^۱ بهترین هماهنگی را با نتایج آزمایشگاهی در شبیه‌سازی پروفیل سطح آب دارد [15]. دوره و همکاران توسعه تلماسه‌های مستغرق را با استفاده از مدل عددی RANS^۲ بررسی کردند. و با یک مدل آزمایشگاهی تک‌جهته درستی‌آزمایی کردند. شبیه‌سازی مراحل مختلف تشکیل شکل‌های بستر با مدل عددی، هماهنگی خوبی با مدل آزمایشگاهی داشت. آن‌ها همچنین دریافتند وجود شکل‌های بستر، مراحل رشد اشکال جدید را کند می‌کند [16]. لغبور به شبیه‌سازی جریان آب روی تلماسه‌های کف بستر رودخانه پارانا آرژانتین با مدل عددی Delft3D پرداخت و مدل عددی خود را با داده‌های آزمایشگاهی درستی‌آزمایی کرد. او پی برد که اندازه منطقه جدایی جریان و حرکت آب روی تلماسه‌ها نه تنها به تاج تلماسه، بلکه به زاویه پایین دست نیز ارتباط دارد [17].

این پژوهش به منظور یافتن معادله‌ای برای پیش‌بینی تعامل هندسه بستر رودخانه و ساختار جریان انجام شد. از دیگر اهداف این پژوهش یافتن مدل آشفته‌گی مناسب برای شبیه‌سازی هندسه شکل‌های بستر رودخانه در شرایط هیدرولیکی متفاوت و ابعاد مختلف هندسه بستر رودخانه است. بیشتر پژوهشگران پیشین از مدل آشفته‌گی RANS به دلیل سادگی و کم هزینه بودن برای شبیه‌سازی هندسه جریان استفاده می‌نمودند. این مدل آشفته‌گی، به دلیل ضعف در محاسبه نوسانات سرعت قادر به تشخیص مناسب جریان‌های گردابی نیست [18]. به همین دلیل باعث عدم نمایش مناسب جدایش جریان در پایین دست تلماسه می‌شود، پس در این پژوهش برای تلماسه‌های بزرگ مقیاس و با زاویه بالای پایین دست (نسبت ارتفاع تلماسه به عمق آب بزرگ‌تر از ۰/۲۵ و زاویه پایین دست ۳۸ درجه) از مدل آشفته‌گی DES^۳ استفاده شده است. در این پژوهش از نرم افزار شبیه‌سازی STAR-CCM+ استفاده شده است، که نخستین کاربرد از این نرم‌افزار برای بررسی تاثیر هندسه تلماسه و ساختار جریان است. این پژوهش با تاکید بر جریان‌های کم

^۳ Detached Eddy Simulation

^۱ Re-Normalisation Group

^۲ Reynolds-Averaged Navier Stokes

و ارتفاع ۰/۹ متر روی تلماسه‌های ثابت با ابعاد و زاویه‌های مختلف صورت گرفت. شن استفاده شده برای ساختن تلماسه‌ها دارای قطر متوسط حدود ۱۳/۲ و ۵/۸ میلی‌متر بود که که به ترتیب با عناوین درشت دانه و ریز دانه نامیده شدند. معتمدی ابعاد مورد تحلیل برای ساخت تلماسه‌ها و توسعه آن‌ها را از مطالعات نلسون و همکاران [23]، آلن [24]، نصیری [25] و داورپناه [26] برگرفته است.

تلماسه‌های مطالعه شده در این پژوهش دارای طول موج یک متری و ارتفاع‌های ۶/۴ و ۸ سانتی‌متری هستند که در دو نوع تاج نوک تیز شکل (۱) و تخت شکل (۲) ایجاد شدند، که در این تقسیم‌بندی تلماسه نوع ۳ از نوع بزرگ مقیاس (نسبت ارتفاع تلماسه به عمق آب بزرگ‌تر از ۰/۲۵ و زاویه پایین دست ۳۸ درجه) و سایر تلماسه‌ها از نوع کوچک مقیاس (نسبت ارتفاع تلماسه به عمق آب کوچک‌تر از ۰/۲۵ و زاویه پایین دست کمتر از ۳۸ درجه) هستند.

شکل ۱. تلماسه تاج تیز به کار رفته [14]

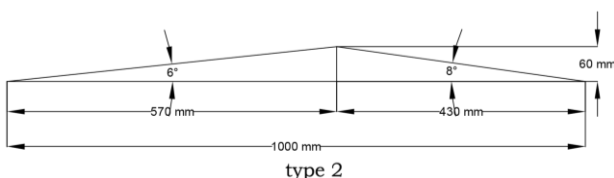


Fig. 1. Used sharp-crested dune [14]

شکل ۲. تلماسه‌های تاج تخت به کار رفته [14]

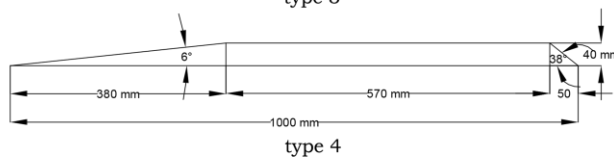
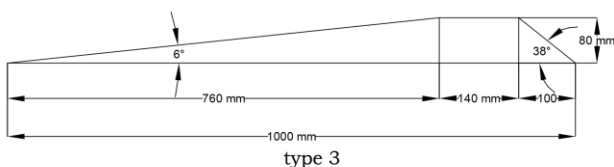
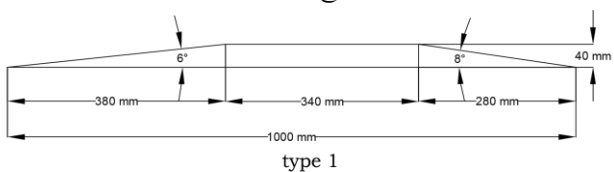


Fig. 2. Used broad-crested dunes [14]

در صورت دائمی در نظر گرفتن جریان، عبارت‌های $\frac{\partial}{\partial t}$ حذف می‌شود.

۲-۲- مدل آشفتگی استفاده شده

مدل شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شده که یک روش پیوندی RANS و LES است به منظور کاهش هزینه محاسباتی روش LES ارائه شد. در دهه‌های اخیر پیشرفت‌های زیادی برای ترکیب روش LES و RANS انجام شده است تا روشی ترکیبی حاصل شود که مزایای هر دو روش LES و RANS را داشته باشد، ضمن اینکه از معایب هر دو روش بکاهد. مدل DES توسط اسپالارت و آلماراس [18] به عنوان یک مدل ترکیبی یک معادله‌ای با دو مقیاس طولی پیشنهاد شد و نتایج بسیار خوبی از آن به ویژه در جریان‌هایی با جدایش بالا به دست آمد [20-22]. در جریان‌های لایه مرزی ساده و پیوسته، استفاده از مدل‌های RANS کمترین هزینه محاسباتی را دارد و از دقت مناسبی برخوردار است، ولی دارای نواقصی اساسی در جریان‌های با جدایش شدید جریان است [18, 20, 22]. از سوی دیگر، هزینه محاسباتی استفاده از LES در جریان‌های محدود بالا است و ارتباط مستقیمی با افزایش عدد رینولدز دارد، اما هزینه کاربرد LES در جریان‌های جدایشی دور از تأثیر دیواره، قابل کنترل و مستقل از عدد رینولدز است [18, 20, 22]. برای حل معادلات حاکم بر جریان سیال، دامنه حل به سلول‌های کوچکتر تقسیم شده و معادلات حل می‌شود. در این پژوهش از نرم‌افزار عددی STAR-CCM+ برای حل معادلات حاکم بر جریان استفاده می‌شود. در این نرم افزار برای تحلیل جریان سیال، معادلات حاکم به روش حجم محدود حل می‌شوند. همچنین در این پژوهش، برای محاسبه سطح آزاد از روش کسر حجمی سیال VOF استفاده می‌شود. روش حل این مدل Implicit Unsteady (ناپایدار ضمنی) است.

۲-۳- مشخصات مدل‌های عددی استفاده شده

برای شبیه‌سازی جریان در کانال از مدل طراحی شده توسط معتمدی [14] استفاده شد، که پژوهش وی در یک کانال آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به طول ۱۲ متر عرض ۰/۷۵ متر

۴-۲- درستی آزمایشی مدل آشفتگی

کلیه شبیه‌سازی‌ها با مدل‌های آشفتگی RANS و LES و DES انجام شد و نتایج آن‌ها با نتایج مدل آزمایشگاهی معتمدی و بالاچاندار مقایسه شد. مطابق شکل (۴) نتایج حاکی از آن است که مدل آشفتگی RANS در تشخیص جدایش جریان در تلماسه‌های بلند و با زاویه بالای پایین دست از دقت کافی برخوردار نیست که این به نوبه خود با نتایج اسپالارت و آلاماراس [18] هماهنگی دارد.

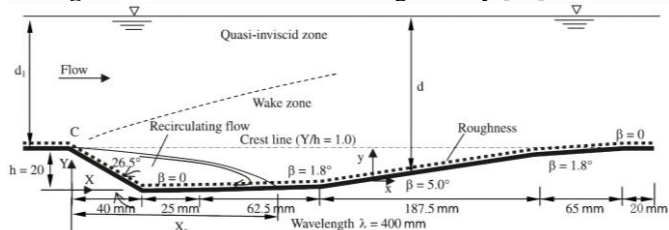
براساس نتایج به دست آمده از مدل عددی، به نظر می‌رسد که مدل آشفتگی LES در تشخیص جدایش جریان در مجاورت بستر می‌تواند مناسب‌تر عمل نماید (شکل ۵ الف). بر این اساس در مجاورت بستر در پایین دست تلماسه ناحیه جدایش جریان کاملاً مشهود است. ولی در لایه‌های جریان دور از تلماسه تولید آشفتگی‌های نسبتاً شدیدی می‌نماید (شکل ۵ ب و ۵ ج). همچنین نیازمند زمان اجرای بیشتری است که یو و همکاران [29] نیز به نتایج مشابهی در چگونگی عملکرد مدل آشفتگی LES روی شکل‌های بستر رسیدند.

مطابق شکل (۶ الف) نتایج استفاده از مدل آشفتگی DES حاکی از آن است که این مدل در تشخیص جدایش جریان تلماسه‌های بزرگ مقیاس از دقت بیشتری برخوردار بوده و از زمان اجرای کمتری در مقایسه با LES برخوردار هستند، ولی این مدل در تلماسه‌های کوچک‌تر در نزدیک بستر تولید گردابه‌های بی‌قاعده می‌کند شکل (۶ ب) و زمان اجرای بیشتری نسبت به مدل آشفتگی RANS دارد، پس در این پژوهش از مدل آشفتگی RANS برای تلماسه‌های کوچک مقیاس و از مدل آشفتگی DES برای تلماسه نوع ۳ که بزرگ مقیاس هست استفاده شد.

در تلماسه‌های با تاج تیز احتمال ایجاد جدایش جریان بیشتر بوده، همچنین روند تغییرات تنش برشی در این نوع تلماسه‌ها تدریجی است. در دو تلماسه با ابعاد یکسان، تلماسه تاج تیز تغییر بیشتری را در ساختار جریان ایجاد می‌کند. در تلماسه‌های تاج تخت روند تغییرات تنش برشی بیشتر بوده، همچنین احتمال تشکیل جدایش جریان در این نوع تلماسه‌ها کمتر است. دبی جریان کانال ۳۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه و در دو عمق ۳۲ و ۲۰ سانتی‌متری در نظر گرفته شد [14].

همچنین در این پژوهش برای شبیه‌سازی جریان در کانال، از مدل طراحی شده توسط بالاچاندار [27] نیز استفاده شد، بالاچاندار به بررسی هندسه تلماسه و تاثیر آن بر ساختار جریان پرداخت، وی از مدل میرلو و رویتر [28] برای هندسه تلماسه استفاده نمود. تعداد ۲۲ تلماسه در یک مقطع مستطیلی ۶۱ در ۶۱ سانتی‌متری به طول ۱۰ متر در آزمایشگاه ایجاد شد. سرعت ورودی ۰٫۴ متر بر ثانیه و عمق جریان ۰٫۱۲ متر بود، و برای کف کانال سه حالت در نظر گرفته شد: ۱. بستر صاف، ۲. بستری که با شبکه‌ای از سیم‌های استیل ضد زنگ ۰٫۷۲ میلی‌متری با فاصله ۶/۳۵ میلی‌متر پوشیده شده‌اند، ۳. بستر پوشیده شده از دانه‌های شن ۱۸ میلی‌متری، که در این پژوهش نوع سوم یعنی بستر پوشیده شده از شن شبیه‌سازی شد. شکل (۳) هندسه تلماسه پژوهش بالاچاندار را نشان می‌دهد. در جدول (۱) مشخصات ابعاد تلماسه‌های استفاده شده در پژوهش آورده شده است.

Fig. 3. Balachandar model dune geometry [27]



شکل ۳. هندسه تلماسه مدل بالاچاندار [27]

جدول ۱. خلاصه ابعاد تلماسه‌ها

Dune length	Stoss side angle (Degree)	Crest length (cm)	Dune height (cm)	Lee side angle (Degree)	Crest type	Dune type
100	6	0	6	8	Sharp	2
100	6	34	4	8	Flat	1
100	6	14	8	38	Flat	3
100	6	57	4	38	Flat	4
40	5	2	2	26.5	Flat	Balachandar

Table 1. Summary of dune dimensions

شکل ۶. نتایج مدل آشفتگی DES (الف) جدایش جریان واضح با تلماسه نوع ۳ و دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و عمق ۳۲ سانتی متر (ب) شکل‌های گردابی بی قاعده در تلماسه‌های کوچک مقیاس (تلماسه نوع ۴ و دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و عمق ۳۲ سانتی متر)

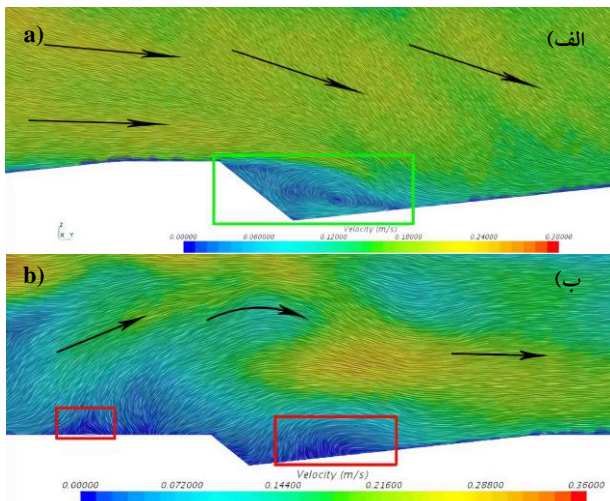


Fig. 6. DES turbulence model results: a) distinguished flow separation zone with dune type 3 and flow rate of 30 liters per second and 32 cm depth, b) irregular eddies formed in small scaled dunes (Dune Type 4 and flow rate of 30 liters per second and depth of 32 cm)

۲-۵- شرایط مرزی

این مدل دارای یک ورودی و یک خروجی است که برای ورودی مدل از شرط مرزی Velocity Inlet با سرعت ثابت منظور شد. برای سطح آزاد و خروجی مدل، شرایط مرزی به صورت فشار خروجی با فشار صفر در نظر گرفته شد تا اثر اتمسفر در محاسبات مدل لحاظ شود. دیواره‌ها و کف کانال نیز با شرط مرزی دیوار لحاظ شدند، برای کف مدل زبری معادل k_s در نظر گرفته شد. شرایط مرزی در شکل (۷) نشان داده شده است. همچنین شرایط اولیه در این مدل سیال تراکم ناپذیر آب با چگالی 1000 kg/m^3 و ویسکوزیته دینامیکی $0.001 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ در دمای ۲۰ درجه در نظر گرفته شده است.

شکل ۷. شرایط مرزی عددی در نرم‌افزار STAR-CCM+

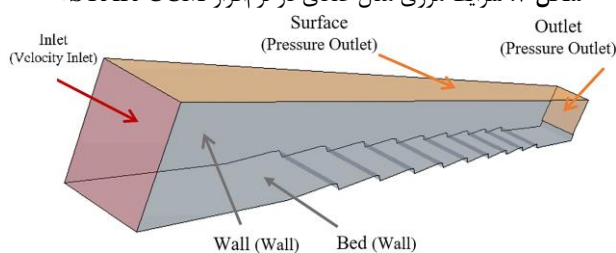


Fig. 7. Numerical model boundary conditions in STAR-CCM+ software

شکل ۴. نتایج مدل آشفتگی RANS (تلماسه نوع ۳ و دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و عمق ۳۲ سانتی متر)

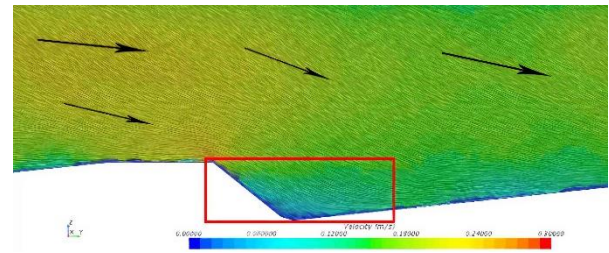


Fig. 4. RANS turbulence model results (dune type 3 and discharge 30 liters per second and 32 cm depth)

شکل ۵. نتایج مدل آشفتگی LES (الف) جدایش جریان واضح (تلماسه نوع ۳ و دبی ۶۰ لیتر بر ثانیه و عمق ۳۲ سانتی متر) (ب) جدایش جریان نامنظم در وجه پایین دست تلماسه (تلماسه نوع ۳ و دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و عمق ۳۲ سانتی متر) (ج) شکل‌های گردابی بی قاعده در وجه بالادست تلماسه (هندسه تلماسه و شرایط هیدرولیکی مشابه مدل بالاچاندار)

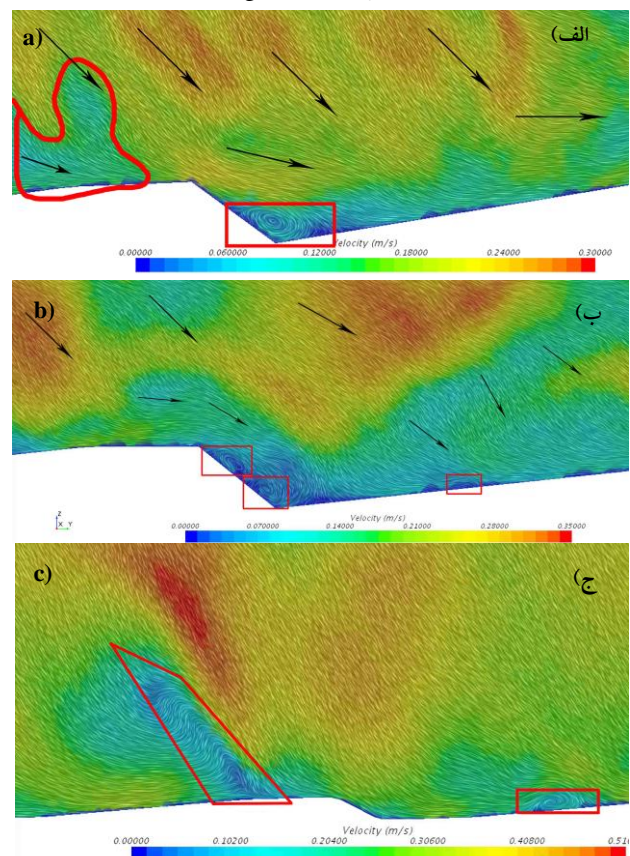


Fig. 5. LES turbulence model results: a) distinguished flow separation zone (dune type 3 and flow rate 60 liters per second and 32 cm depth), b) irregular flow separation zone in the lee side of dune (dune type 3 and flow rate 30 liters per second and 32 cm depth), c) irregular eddies formed in the stoss side of dune (dune geometry and hydraulic conditions similar to the Balachandrar model)

۲-۶- شبکه بندی مدل عددی

یکی از مهم ترین مراحل در پژوهش عددی، انتخاب بهینه ترین شبکه بندی است چرا که با شبکه بندی درشت، گرادیان تغییرات افزایش می یابد و بدیهی است که نمی توان به پاسخ صحیح دست یافت.

رسید. ولی ریزتر کردن شبکه نیز باید با احتیاط صورت گیرد، زیرا اولین نتیجه آن افزایش سلول های محاسباتی و طولانی شدن زمان حل عددی است. لازم است پس از شبیه سازی فیزیکی مدل، بهینه سازی شبکه بندی انجام گیرد. به منظور حساسیت سنجی مدل عددی نسبت به تعداد سلول محاسباتی و همچنین برای بهینه کردن زمان اجرا و دقت خروجی از چندین بلوک تغییر ابعاد شبکه بندی در نقاط داده برداری و محل های قرارگیری تلماسه ها استفاده شد.

برای انتخاب ابعاد شبکه بندی مناسب تعداد ۸ مدل اجرا شد تا زمان و دقت مدل بهینه شود. مدلی که دارای ریزترین حالت شبکه بندی بود دقت ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد و سایر حالت ها با این مدل مقایسه شدند و میزان انحراف پروفیل سرعت شبیه سازی های مختلف مقایسه شد. با توجه به شکل (۸) و جدول (۲) شبیه سازی ۱ دارای زمان اجرا و دقت مناسب است، با ریزتر کردن شبکه بندی تغییر قابل توجهی در دقت مدل اعمال نمی شود. اما زمان اجرا برای رسیدن به ۶۰ ثانیه به طور محسوسی افزایش می یابد، همچنین با درشت تر کردن شبکه بندی میزان انحراف و پراکندگی خطوط جریان و اختلاط آب و هوا بسیار افزایش می یابد، پس ابعاد شبکه بندی شبیه سازی ۱ به عنوان گزینه برتر انتخاب شد. شکل (۹) محل قرارگیری بلوک ها و شکل (۱۰) شبکه بندی نمونه برگزیده را نمایش می دهد.

شکل ۸. پروفیل های طول سرعت در حالت های مختلف شبکه بندی

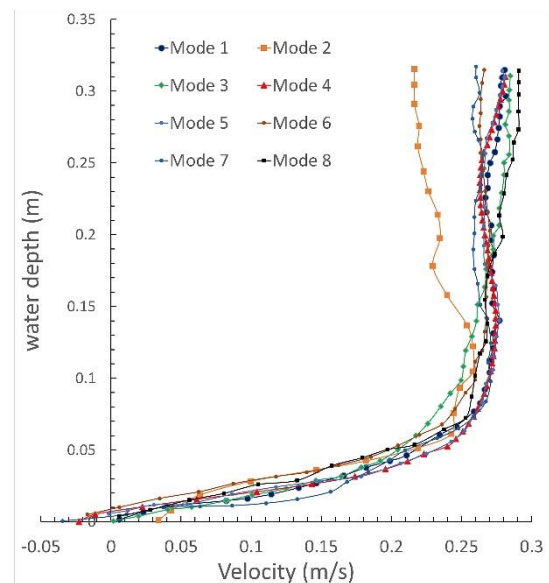


Fig. 8. Velocity profiles in different meshing modes

ینابراین شبکه بندی باید ریزتر شود تا با فشرده سازی نقاط شبکه در نواحی که متغیرهای جریان تحت تغییرات شدید قرار دارند بتوان تمام موارد را بررسی نمود و در یک سلول محاسباتی با مطالعه همه جوانب عددی به جواب دقیق تری

شکل ۹. بلوک های شبکه بندی

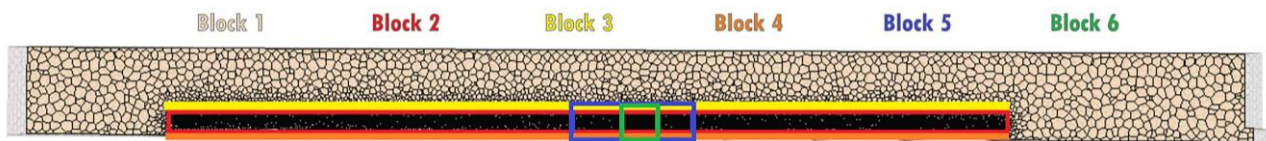


Fig. 9. Meshing blocks

جدول ۲. شبیه سازی های حساسیت سنجی شبکه بندی

Percentage of flow deviation	Time required to reach 60 sec in simulation time (hour)	Dimensions of grid in block 1 (mm)	Dimensions of grid in block 2 (mm)	Dimensions of grid in block 3 (mm)	Dimensions of grid in block 4 (mm)	Dimensions of grid in block 5 (mm)	Dimensions of grid in block 6 (mm)	Simulation Number
7	50	100	20	10	20	10	5	1
19	40	100	40	20	20	10	5	2
5	66	100	20	10	5	10	5	3
1	82	100	20	10	10	10	1	4
3	74	100	20	10	10	10	2	5
0	98	100	20	10	10	5	1	6
6	61	100	20	10	10	5	5	7
7	55	100	20	10	10	10	5	8

Table. 2. Meshing sensitivity simulations

دارند می‌توان دریافت که مدل آشفتگی DES به زمان بیشتری برای رسیدن به دقت کافی نیاز دارد و حدود زمان ۶۰ ثانیه به دقت کافی خواهد رسید و برای اطمینان زمان ۷۰ ثانیه برای شبیه‌سازی مناسب است.

شکل ۱۱. پروفیل سرعت جریان در زمان‌های مختلف

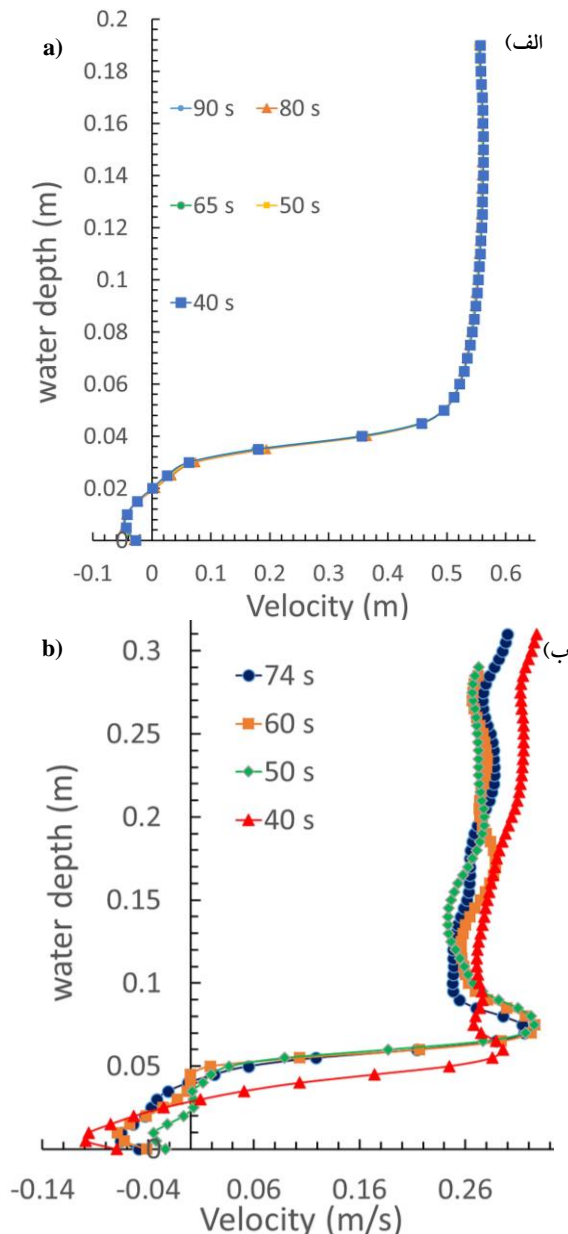


Fig. 11. Flow velocity profiles at different times

زمان‌های به دست آمده را می‌توان زمان به تعادل رسیدن جریان در نظر گرفت، زیرا پروفیل سرعت از این زمان به بعد ثابت شده و تغییراتی نداشته پس جریان به حالت تعادل رسیده است.

شکل ۱۰. شبکه‌بندی محل نمونه‌برداری مدل عددی

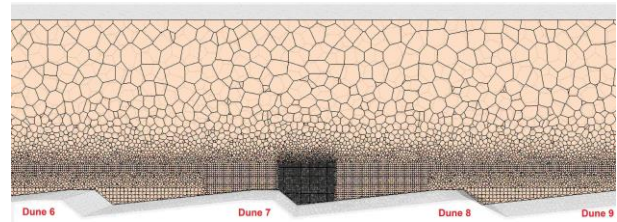


Fig. 10. Meshing of numerical model sampling location

۲-۷- زمان به تعادل رسیدن مدل عددی

شبیه‌سازی‌های مدل عددی نیازمند گذشت زمان است. این زمان با توجه به اندازه و ابعاد شبکه‌بندی مدل عددی و مدل‌های آشفتگی مورد استفاده متغیر است. هر چه طول مدت زمان اجرای مدل بیشتر باشد، دقت نتایج شبیه‌سازی افزایش پیدا می‌کند. پس از گذشت مدت زمان معین دقت شبیه‌سازی به حدود ۸۰ الی ۹۰ درصد مقدار نهایی آن خواهد رسید، پس برای صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌توان به این مقدار دقت قابل قبول اکتفا نمود. برای به دست آوردن زمان بهینه شبیه‌سازی باید آزمایش‌هایی صورت گیرد. از آنجا که زمان شبیه‌سازی هر مدل آشفتگی متفاوت است دو آزمایش متفاوت با دو نوع هندسه و شرایط هیدرولیکی متفاوت یکی با مدل آشفتگی RANS و دیگری با مدل آشفتگی DES انجام شد. با توجه به اینکه معادلات RANS ساده‌تر است، زودتر از مدل آشفتگی DES به نتیجه می‌رسد. برای شبیه‌سازی مدل آشفتگی RANS زمان‌های ۴۰، ۵۰، ۶۵، ۸۰ و ۹۰ ثانیه از مدل عددی برداشت شد و پروفیل سرعت در مرز بین تلماسه هفتم و هشتم با یکدیگر مقایسه شد (شکل ۱۱). با استناد به نمودار (۱۱-الف) می‌توان دریافت که این مدل از همان ثانیه‌های ابتدایی به دقت قابل قبول و نزدیک به دقت نهایی دست یافته است پس حدود زمان ۵۰ ثانیه برای رسیدن به دقت کافی در شبیه‌سازی‌های مربوط به مدل آشفتگی RANS کافی است. برای به دست آوردن زمان بهینه شبیه‌سازی مربوط به مدل آشفتگی DES زمان‌های ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۴ ثانیه از مدل عددی برداشت شد و مطابق روش قبل پروفیل سرعت در مکان مشخصی از هندسه تلماسه با یکدیگر مقایسه شد.

با توجه به نمودار (۱۱-ب) و از آنجایی که پروفیل‌های سرعت در دو زمان ۶۰ و ۷۴ ثانیه کمتر از ۵ درصد با یکدیگر اختلاف

۲-۸- واسنجی مدل عددی

تعداد ۲۸ مدل شبیه‌سازی پس. نتایج آزمایشگاهی ۱۱ مورد از این آزمایش‌ها در مقالات معتمدی موجود بود که بررسی و مقایسه با نتایج مدل عددی قرار گرفت.

داده‌های برداشت شده در نرم‌افزار STAR-CCM+ به صورت فایل CSV خروجی گرفته شد، برای تسهیل تبدیل خروجی های نرم‌افزار به فایل‌های PLT قابل فهم نرم‌افزار TEC-PLOT برنامه‌ای در نرم‌افزار MATLAB نوشته شد.

در تمامی آزمایش‌ها برای محاسبه درصد خطا پروفیل سرعت مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی از فرمول (۵) استفاده شده است.

$$\text{Percent Error} = \frac{\sum_{i=1}^n (Exp - Num)}{\sum_{i=1}^n (Exp)} \times 100 \quad (5)$$

شکل ۱۲. نمودار مقایسه‌ای پروفیل‌های سرعت جریان آزمایش ۲۹ (مدل آشفتگی RANS، هندسه مدل بالاچاندار (۲۰۰۸) با دبی ۳۶٫۷ لیتر بر ثانیه و عمق ۱۴ سانتی‌متر)

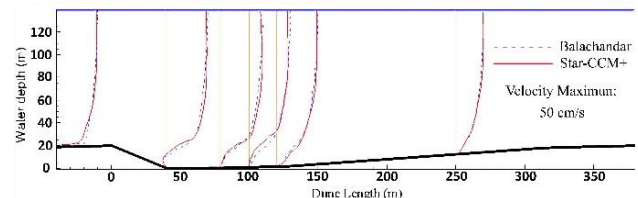


Fig. 12. Comparative graph of flow velocity profiles in Experiment 29 (RANS turbulence model, Balachandar 2008 model geometry with a discharge of 36.7 liters per second and a 14 cm depth)

نتایج حاصل از شکل‌های (۱۲ و ۱۳) نشان می‌دهد که مقادیر پروفیل سرعت مدل عددی و مدل آزمایشگاهی معتمدی و

بالاچاندار تنها حدود ۹/۴٪، ۷/۴٪ با هم اختلاف دارند که نشان از هماهنگی مناسب نتایج مدل عددی پژوهش حاضر با مدل آزمایشگاهی پژوهشگران پیشین دارد. با توجه به هماهنگی مناسب مدل عددی با مدل آزمایشگاهی می‌توان به نتایج مدل عددی در دیگر شبیه‌سازی‌ها برای سایر بخش‌ها اتکا نمود.

نتایج مدل عددی STAR-CCM+ با مدل عددی SSIIM که در پژوهش معتمدی استفاده شده بود مقایسه شد که پیش‌بینی پروفیل سرعت در آزمایش ۱۵ توسط نرم‌افزارهای STAR-CCM+ و SSIIM در شکل (۱۳) مشخص است. نتایج پیش‌بینی‌های این دو نرم‌افزار به طور میانگین با یکدیگر حدود ۱۷٫۳۴ درصد اختلاف دارد.

۳- تحلیل ابعادی

با توجه به موثر بودن پارامترهای متعدد در تشکیل شکل بستر می‌توان از روش تحلیل ابعادی برای بی‌بعد کردن پارامترها استفاده کرد. پارامترهای زیادی در ایجاد و توسعه شکل بستر نقش دارند که به شرح زیر هستند.

$$f(V_*, H, D_{50}, \bar{V}, g, \mu, \rho, \rho_s, k_s, \lambda, \theta_{US}, \theta_{DS}, y, S, \tau_0, b, V_c, y_c) = 0 \quad (6)$$

که در آن V_* سرعت برشی، H ارتفاع تلماسه، D_{50} اندازه متوسط ذرات، \bar{V} سرعت متوسط جریان، g شتاب ثقل، μ ویسکوزیته دینامیکی، ρ چگالی آب، ρ_s چگالی ذرات بستر، k_s ارتفاع معادل زبری، λ طول تلماسه، θ_{US} زاویه بالادست تلماسه، θ_{DS} زاویه پایین دست تلماسه، y عمق آب، S شیب بستر، τ_0 تنش برشی، b عرض کانال، V_c سرعت بحرانی حرکت ذرات، y_c عمق بحرانی حرکت ذرات است.

شکل ۱۳. نمودار مقایسه‌ای پروفیل‌های سرعت جریان آزمایش ۱۵ (مدل آشفتگی DES، تلماسه نوع ۳ و دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و عمق ۳۲ سانتی‌متر)

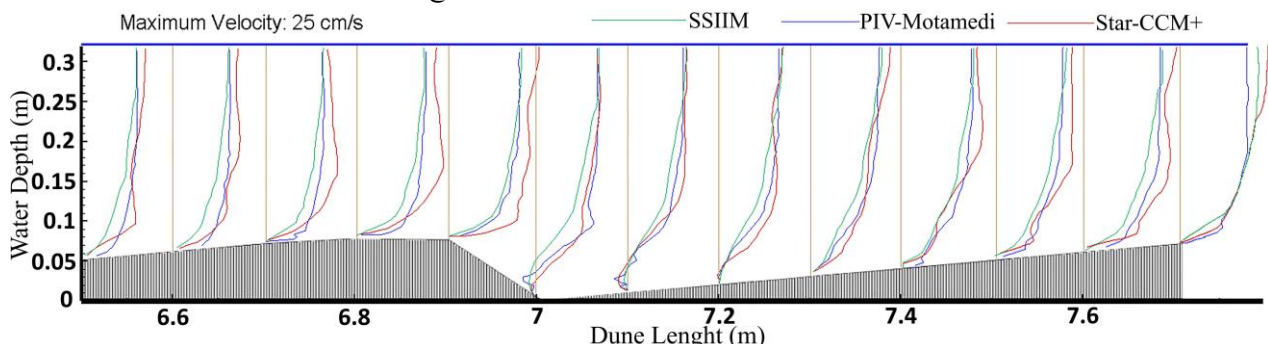


Fig. 13. Comparative graph of flow velocity profiles in Experiment 15 (DES turbulence model, Dune type 3 and 30 l/s discharge and 32 cm depth)

با قراردادن داده‌های مساله در فرمول (۹) مشاهده شد که مقادیر محاسباتی $\frac{\lambda}{H}$ توسط معادله به طور میانگین تنها ۱۱/۲۵ درصد با مقادیر مشاهداتی تفاوت دارد، همچنین پارامترهای آماری نشان دهنده دقت بسیار بالای معادله به دست آمده است. نمودار (۱۴) مقایسه $\frac{\lambda}{H}$ مشاهده شده و محاسبه شده براساس فرمول (۹) را نمایش می‌دهد.

شکل ۱۴. مقایسه نسبت طول به ارتفاع تلماسه مشاهده شده و محاسبه شده براساس فرمول (۹)

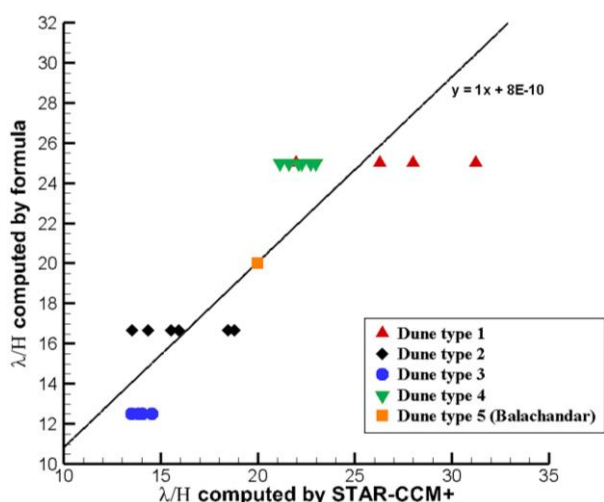


Fig. 14. Comparison of the ratio of length to height observed and calculated according to formula (9)

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری برای بدست آوردن مقاومت جریان منجر به کاهش هزینه و زمان برای دستیابی به مدل عددی می‌شود. در این پژوهش برای شبیه‌سازی مدل عددی از نرم‌افزار STAR-CCM+ استفاده شد. برای درستی آزمایشی عملکرد مدل عددی، از نتایج آزمایشگاهی معتمدی [14] و بالاچاندار [27] استفاده شد، نتایج حاصل از مقایسه مدل عددی و مدل آزمایشگاهی نشان داد که تنها حدود ۹/۵٪، ۱۵/۵٪، ۱۴/۵٪، ۹/۴٪، ۲۲/۲٪ و ۷/۴٪ با هم اختلاف دارند، این میزان از خطا نشان از دقت خوب مدل عددی دارد. در این پژوهش ساختار جریان روی پنج نوع تلماسه بررسی شد، نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها به صورت زیر است:

تعداد ۱۸ پارامتر موثر بر تشکیل تلماسه وجود دارد که با در نظر گرفتن ۳ پارامتر اصلی تعداد ۱۵ اعداد بدون بعد به دست می‌آید. با روش پی باکینگهام^۴ می‌توان پارامترهای بدون بعد π_1 تا π_{15} را به دست آورد [30]. با توجه به ثابت بودن پارامترهای V_c ، ρ_s ، γ_c و S ، معادله (۶) به صورت اعداد بدون بعد π_1 تا π_6 به صورت معادله ۷ به دست آمد:

$$f\left(\frac{\lambda}{H}, \theta_{us}, \theta_{ds}, Fr, \frac{k_s}{y}, \frac{k_s}{y}\right) = 0 \quad (7)$$

۳-۱- استخراج فرمول نسبت $\frac{\lambda}{h}$

پژوهشگران مختلف توابعی مانند تابع (۷) به صورت تابع توانی (Power Law) بیان می‌کنند بنابراین تابع (۷) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\lambda}{H} = a \theta_{us}^b \theta_{ds}^c (Fr^2)^d \left(\frac{k_s}{y}\right)^e \left(\frac{V_*}{\bar{V}}\right)^f \quad (8)$$

در فرمول (۸)، پارامترهای طول λ و ارتفاع H و شیب پایین‌دست θ_{DS} و شیب بالادست θ_{US} تلماسه و پارامترهای سرعت متوسط \bar{V} و عمق جریان y و ارتفاع معادل زبری k_s به عنوان ورودی مدل مشخص هستند. همچنین پارامترهای فرود Fr و سرعت برشی V_* از مدل‌های شبیه‌سازی شده توسط نرم افزار STAR-CCM+ به دست می‌آیند. برای به دست آوردن سرعت برشی فرمول‌های زیادی وجود دارد، اما چون نتایج نرم‌افزار در بخش قبل اعتماد سازی شد، پس می‌توان از داده‌های نرم‌افزار برای به دست آوردن سرعت برشی استفاده کرد. به کمک نرم‌افزار STAR-CCM+ می‌توان سرعت برشی تنش برشی در کف تلماسه را به دست آورد. تنش برشی از تاج، کف، شیب بالادست و پایین‌دست تلماسه برداشت شد.

از تعداد ۲۹ شبیه‌سازی موجود، از حدود ۶۰ درصد آن‌ها یعنی ۱۷ شبیه‌سازی برای به دست آوردن ضرایب معادله (۶) و از سایر نتایج برای آزمون معادله به دست آماده استفاده شد. ضرایب معادله ۶ را می‌توان با کمک رگرسیون به دست آورد.

$$\frac{\lambda}{H} = 1.47 \theta_{us}^{-0.023} \theta_{ds}^{-0.089} (Fr^2)^{-0.072} \left(\frac{k_s}{y}\right)^{0.032} \left(\frac{V_*}{\bar{V}}\right)^{-1.188} \quad (9)$$

References

۶- مراجع

- [1] Bathurst, J.C. 1985. Flow Resistance Estimation in Mountain Rivers, Journal of Hydraulic Engineering ASCE, Vol 111, 625-641.
- [2] Gilbert, G. K. 1914. The transition of debris by running water. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 86,263 .
- [3] Soulsby, R. L. 1989. Bedform migration in sandy estuaries. H.R Wallingford Res. Rep. No. SR 208, 16.
- [4] Thélusmond, J., Chevalier, L., & DeVantier, B. 2013. The use of plastic media in a movable bed model to study sedimentary processes in rivers. International Journal Of Hydrology Science And Technology, 3(2), 93.
- [5] Engelund, F., & Hansen, E. 1967. A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Teknisk Vorlag, Copenhagen, Denmark.
- [6] Reisenbüchler, M., Bui, M., Skublics, D., & Rutschmann, P. 2019. An integrated approach for investigating the correlation between floods and river morphology: A case study of the Saalach River, Germany. Science Of The Total Environment, Vol. 647, 814-826.
- [7] Van Rijn, L.C. 1984c. Sediment Transport, Part III: Bed Forms and Alluvial Roughness. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 12.
- [8] Balachandar, R. & Patel, V.C. 2002. Rough Wall Boundary Layer on a Plate in an Open Channel. J. Hydr. Engrg., ASCE (12810), 947-951.
- [9] Venditi, J. G. 2007. Turbulent flow & drag over fixed two- and three-dimensional dunes. J. Geophys. Res. 112 F04008.
- [10] Schippa, L., Cilli, S., Ciavola, P., & Billi, P. 2019. Dune Contribution to Flow Resistance in Alluvial Rivers. Water, 11(10), 2094.
- [11] Paarlberg, A., Dohmen-Janssen, C. M., Termes, A. P. P., & Hulscher, S. J. M. H. 2005. Model for river dune development including a parameterization for flow separation. 231.
- [12] Tjerry, S., & Fredsøe, J. 2005. Calculation of dune morphology. Journal Of Geophysical Research: Earth Surface, 110(F4).
- [13] Yue, W., Lin, C., & Patel, V. 2006. Large-Eddy Simulation of Turbulent Flow over a Fixed Two-Dimensional Dune. Journal Of Hydraulic Engineering, 132(7), 643-651.
- [14] Motamedi, A., Afzalimehr, H. Singh, V., & Dufresne, L. 2012 Experimental Study on the Influence of Dune Dimensions on Flow Separation. Journal of Hydrologic Engineering, 19(1), 78-86.
- [15] Abbaspour A., & Kia S.H. 2014. Numerical Investigation of Turbulent Open Channel Flow with Semi-cylindrical Rough Beds, KSCE Journal of Civil Engineering, 18(7), 2252- 2260.
- [16] Doré, A., Bonneton, P., Marieu, V., & Garlan, T. 2016. Numerical modeling of subaqueous sand dune morphodynamics. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 121(3), 565-587.
- [17] Lefebvre, Alice. 2019. Three-Dimensional Flow Above River Bedforms: Insights From Numerical Modeling of a Natural Dune Field (Río Paraná,

۱. مقایسه نتایج مدل عددی STAR-CCM+ و SSIIM با نتایج مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل‌های عددی از دقت مناسبی در پیش‌بینی ساختار جریان روی شکل‌های بستر برخوردار هستند.
۲. نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان با مدل آشفتگی RANS نشان می‌دهد که این مدل در تشخیص جدایش جریان در تلماسه‌های بزرگ مقیاس از دقت کافی برخوردار نبوده و تنها در تلماسه‌های کوچک مقیاس عملکرد مناسبی دارد.
۳. نتایج به دست آمده از مدل آشفتگی LES نشان‌دهنده دقت مناسب این مدل در تشخیص جدایش جریان در نزدیکی تلماسه‌های بزرگ مقیاس است، ولی در فواصل دور از بستر و نیز در تلماسه‌های کوچک مقیاس تولید گردابه‌های بی‌قاعده می‌کند.
۴. مدل آشفتگی DES در تشخیص جدایش جریان تلماسه‌های بزرگ مقیاس از دقت مناسبی برخوردار بوده ولی در نزدیکی بستر تلماسه‌های کوچک مقیاس تولید گردابه‌های بی‌قاعده می‌کند.
۵. بهترین حالت استفاده از مدل‌های عددی، استفاده از مدل آشفتگی RANS در تلماسه‌های کوچک مقیاس و مدل آشفتگی DES در تلماسه‌های بزرگ مقیاس است.
۶. ریزتر شدن شبکه‌بندی با دقت مدل رابطه مستقیم و با زمان اجرای مدل رابطه عکس دارد، با انتخاب شبکه‌بندی ترکیبی می‌توان یک نسبت مناسب بین دقت و زمان اجرای مدل به دست آورد.
۷. مدل پس از گذشت زمان معینی به تعادل می‌رسد و پارامترهای جریان تغییر محسوسی نمی‌کند، پس با به دست آوردن زمان تعادل، در زمان شبیه‌سازی مدل صرفه‌جویی نمود.
۸. به کمک روش تحلیل ابعادی می‌توان پارامترهای مستقل و وابسته به برهمکنش هندسه تلماسه و جریان را دریافت.
۹. نتایج ارزیابی رابطه به دست آمده برای بررسی تاثیر هندسه تلماسه بر هیدرولیک جریان، نشان داد که رابطه ارائه شده برای اشکال هندسی متفاوت (تاج تیز و پهن، تلماسه بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس) و شرایط هیدرولیکی مختلف با خطای $11/25\%$ و $0/86 R^2$ با توجه به طبیعت کاملاً تصادفی تشکیل شکل بستر، دقت خوبی دارد.

- [25] Nasiri Dehsorkhi, A., 2010, Interaction of vegetation cover, bed forms and flow structure on distributions of velocity and turbulent intensities, Master's Thesis, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (In Persian)
- [26] DavarPanah, Sh. 2011. Investigation of Interaction of Straight Crested Gravel Bedforms and Vegetated Banks on Turbulent Flow Components, Master's Thesis, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (In Persian)
- [27] Balachandar, R., & Patel, V. 2008. Flow over a fixed rough dune. Canadian Journal of Civil Engineering, 35(5), 511-520.
- [28] Van Mierlo, M. C. L. M. & de Ruiter, J. C. C. 1988. Turbulence measurements above artificial dunes, Report on measurements. Report Q789, WL | Delf Hydraulic, Delf, The Netherlands.
- [29] Yue, W., Lin, C., & Patel, V. 2003. Numerical investigations of turbulent free surface flows using level set method and large eddy simulation, Tech. Rep. 435, 170 pp., Iowa Inst. of Hydraul. Res., Iowa City.
- [30] Sharifi, M., Ghoreishi, H., Majdzadeh, M.R., Beheshti, S. 2019. Numerical simulation of bedform effect on flow resistance in shallow water in sand bed rivers, MSC Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. (In Persian)
- Argentina). Journal Of Geophysical Research: Earth Surface, 124(8), 2241-2264.
- [18] Spalart, P.R., & Allmaras, S.R. 1994. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. La RechercheA_erospatiale, Vol. 1, 5-21.
- [19] Mustaffa, N., Ahmad, N., & Razi, M. 2016. Variations of Roughness Coefficients with Flow Depth of Grassed Swale. IOP Conference Series: Materials Science And Engineering, 136, 012082.
- [20] Shur M., Spalart P.R., Strelets M., & Travin A. 1999. Detached-eddy simulation of an airfoil at highangle of attack. Engineering Turbulence Modeling and Experiments, Vol. 4, 669-678.
- [21] Bunge U., Mockett C., & Thiele F. 2007. Guidelines for implementing Detached-Eddy Simulation using different models. Aerospace Science and Technology, Vol. 11, 376-385.
- [22] Viswanathan A.K., & Tafti D.K. 2006. Detached eddy simulation of turbulent flow and heat transfer in a two-pass internal cooling duct. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 27, 1-20.
- [23] Nelson, J. M., McLean, R. & Wolfe, S. 1993. Mean flow and turbulence over fixed, two-dimensional bed form. Water Resour. Res. 29:3935-3953.
- [24] Allen, J. R. L. 1985. Principles of Physical Sedimentology. Chapman and Hall, 272

Numerical simulation of bedform effect on flow structure in shallow rivers

M. Sharifi^{1*}, H. Ghoreishi Najafabadi², M. R. Majdzadeh Tabatabai³, Sa. Beheshti⁴

1-MSc in Hydraulic and Structural Engineering, Shahid Beheshti University

2-Assistant Professor, Department of Water Engineering, Shahid Beheshti University

3-Assistant Professor, Department of Water Engineering, Shahid Beheshti University (corresponding author)

4-Instructor, Department of Water Engineering, Shahid Beheshti University

m_majdzadeh@sbu.ac.ir

Abstract:

One way to understand the behavior of rivers is to study of flow structures and bedforms. Most rivers have rough beds, that are called bedforms. These shapes have different types depending on the hydraulic conditions that cause the resistance to flow, so sufficient knowledge of the hydraulic resistance of the flow is necessary to calculate discharge, depth, water velocity, flood prediction and sediment transport to reduce the damages that are caused by rivers. Despite years of research and experimentation on bedforms, there is still no adequate and accurate equation to predict the geometry of bedforms and their interaction with flow. The RANS turbulence model is not sufficiently accurate in detecting flow separation in high-altitude and high-angle lee side dunes, but it is more appropriate in other dunes. The LES turbulence model can be more appropriate in detecting flow separation in the vicinity of the bed. But in the layers away from the dune, it produces relatively severe turbulences. The DES turbulence model is more accurate in detecting the flow separation in large-scale dunes and has less execution time than the LES, but this model produces irregular vortices in smaller dunes near the bed. In this research, with the aim of investigating the effect of dune geometry on flow structure, numerical simulation of flow motion on dunes in open channel duct was investigated. In this regard, 29 simulations were performed to study the effect of the geometry of five types of dune with different angles and heights in different hydraulic conditions and different bed roughnesses with RANS and DES turbulence models. The STAR-CCM+ was used in order to simulate the numerical model in this research. This software provides highly realistic results by providing a seamless environment with high network production capability and extensive simulation tools, which helps professionals in the process of working with fluids. In this research, VOF method is used to calculate free surface area, and the solution method is Implicit Unsteady. In order to sensitize the numerical model to the number of computational cells as well as to optimize the runtime and output accuracy, several blocks of lattice dimensionality change in data points and dune locations were used. To select the appropriate networking dimensions, 8 models were run to optimize the time and accuracy of the model. To evaluate the accuracy of the simulations, the numerical model results were compared with those of previous researchers. The results of comparison of the numerical model and the experimental model showed that only about 9.5%, 15.5%, 14.5%, 9.4%, 12.2% and 7.4% were different. This error rate indicates good numerical model accuracy. Also the results of numerical model + STAR-CCM were compared with SSIIM numerical model. then, by using the dimensional analysis, effective factors on the interaction of dune geometry and flow structure were investigated and finally, a formula was developed to predict this interaction. The results of the evaluation of the obtained formula for investigating the effect of dune geometry on the hydraulic flow showed that the presented formula with error of 11.25% and $0.86 R^2$, due to the completely random nature of bedform formation, is very accurate.

Keywords: Bedform, Dune, Dimensional Analysis, Flow Resistance, Numerical Simulation, STAR-CCM+