

## مشخصات جریان متلاطم حول صفحات متصل به ساحل

سارا احمدی عدلی<sup>۱\*</sup>، اکرم عباسپور<sup>۲</sup>، علی حسین زاده دلیر<sup>۳</sup> و جواد پارسا<sup>۴</sup>

### چکیده

بهبود شرایط زیست‌محیطی رودخانه‌ها یکی از جنبه‌های اصلی مهندسی رودخانه در دهه‌های گذشته بوده است. سازه‌های زیست‌محیطی عموماً با هدف کنترل بستر رودخانه‌ها، تثبیت سواحل و بهبود شرایط اکوسیستم رودخانه‌ها طراحی و اجرا می‌شوند. صفحات متصل به ساحل یکی از انواع سازه‌های زیست‌محیطی هستند که در تحقیق حاضر تأثیر حالت‌های مختلف هندسی و نفوذپذیری این سازه‌ها بر الگوی جریان متلاطم بررسی شده است. با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت و مدل گرداب‌های بزرگ، میدان جریان حول صفحات متصل به ساحل در یک کانال مستقیم شبیه‌سازی شده است. دقت و قابلیت مدل گرداب‌های بزرگ، با مقایسه مقادیر پروفیل سطح آب به دست آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی، ارزیابی شد. نتایج برآیند سرعت حول صفحات متصل به ساحل، نشان‌دهنده وجود دو ناحیه در اطراف این سازه‌ها ناشی از اثرات موضعی صفحات متصل به ساحل و تنگ‌شدگی کانال است. پارامترهایی هم‌چون سرعت دماغه، سرعت بیشینه و زاویه انحراف جریان تحت تأثیر اندرکنش گرداب‌های مختلف، شرایط هندسی و ساختاری صفحات متصل به ساحل دچار تغییر می‌شوند. به‌طور کلی با افزایش نفوذپذیری، صفحات متصل به ساحل تأثیر قابل توجهی بر الگوی جریان ندارند. همچنین با افزایش نفوذپذیری، بیشینه تنش برشی بستر به محور مرکزی کانال منتقل می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** سازه‌های زیست‌محیطی، فلوئنت، مدل گرداب‌های بزرگ، نفوذپذیری، هندسه.

ارجاع: احمدی عدلی س. عباسپور ا. حسین‌زاده دلیر ع. و پارسا ج. ۱۴۰۲. مشخصات جریان متلاطم حول صفحات متصل به ساحل. مجله پژوهش آب ایران. ۱۷: ۵۱-۷۳. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14436.2538>

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

\* نویسنده مسئول: [saraAhmadi@tabrizu.ac.ir](mailto:saraAhmadi@tabrizu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۴

## مقدمه

با توجه به تأثیر فرسایش و تخریب سواحل رودخانه‌ها در تغییرات ایجادشده در شرایط عمومی، ویژگی‌های هندسی، خصوصیات هیدرولیکی و زیستی رودخانه‌ها، کنترل و مهار این پدیده یکی از مسائل مهم آب و خاک است. صفحات متصل به ساحل یکی از روش‌های غیرمستقیم حفاظت از سواحل و اصلاح الگوی جریان هستند که اغلب از سنگ، الوار یا مصالح طبیعی موجود در رودخانه‌ها و مناطق اطراف آن‌ها ساخته می‌شوند. به‌طورکلی نحوه عملکرد سازه‌های زیست‌محیطی هم‌چون صفحات متصل به ساحل در مقایسه با سازه‌های حفاظتی مرسوم هم‌چون آبشکن‌های نفوذناپذیر تاحدودی متفاوت بوده و اثرات مخرب و جبران‌ناپذیری بر عملکرد طبیعی رودخانه‌ها ندارند (بهویان و همکاران، ۲۰۱۰). الگو و مشخصات میدان جریان حول آبشکن‌ها هم‌چون توزیع تنش برشی، سرعت‌های موضعی، الگو و ساختار جریان‌ات متوسط و آشفته در تحقیقات زیادی مطالعه شده است (زغلول، ۱۹۷۴؛ تینگسانچالی و ماهسوران، ۱۹۹۰؛ اتما و موست، ۲۰۰۴؛ مک‌کوی و همکاران، ۲۰۰۸؛ دوان و همکاران، ۲۰۰۹؛ برویس و همکاران، ۲۰۱۴). ژو (۲۰۰۱) توزیع پروفیل‌های سرعت حول آبشکن مستغرق با استفاده از مدل گرداب‌های بزرگ را مطالعه کرده است. زولین (۲۰۰۶) الگوی میدان جریان حول آبشکن غیرمستغرق را به‌صورت سه‌بعدی و توسط مدل گرداب‌های بزرگ بررسی کرده است. بهویان و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر صفحات متصل به ساحل مثلثی‌شکل بر تغییرات توپوگرافی بستر، الگو و مشخصات میدان جریان را بررسی کردند. کانگ و همکاران (۲۰۱۱) مشخصات جریان متلاطم و نحوه توزیع سرعت حول آبشکن‌های مستطیلی و مثلثی‌شکل تحت شرایط مختلف میزان نفوذپذیری و زاویه دماغه را مطالعه و براساس نتایج به‌دست‌آمده، تغییرات ایجادشده در ناحیه چرخشی پایین‌دست این سازه‌ها را بررسی کردند. تراگوچی و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقی الگوی رسوب و مشخصات جریان را حول آبشکن‌های نفوذپذیر، نفوذناپذیر و سازه‌های ترکیبی با عنوان باندال‌لایک مطالعه کردند. فنگ و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر حضور آبشکن غیرمستغرق در میدان جریان را با استفاده از مدل گرداب‌های بزرگ شبیه‌سازی کردند. بهرامی یاراحمدی و بجستان (۲۰۱۵) تغییرات الگوی جریان و رسوب را در یک خم ۹۰ درجه

ملازم تحت تأثیر حالت‌های مختلف فواصل مابین صفحات متصل به ساحل مثلثی‌شکل بررسی کردند. فرو و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیقی سازه جدیدی را برای حفاظت از سواحل در رودخانه‌های مئاندری پیشنهاد کرده و عملکرد آن را مورد ارزیابی قرار دادند. سازه مذکور، ترکیبی از آبشکن نفوذپذیر و صفحه مثلثی‌شکل بود. وانگ و همکاران (۲۰۲۰) الگو و مشخصات میدان جریان متلاطم را در کانال‌های عریض و باریک بررسی کردند. ابدو و همکاران (۲۰۲۱) در یک خم ۱۹۳ درجه با استفاده از مدل گرداب‌های بزرگ، میدان جریان را شبیه‌سازی کردند.

به‌طورکلی مطابق با بررسی‌های صورت‌گرفته، مطالعات مربوط به صفحات مثلثی‌شکل اغلب در قوس‌ها به‌صورت نفوذناپذیر و شرایط بستر رسوبی بوده و عمدتاً تغییرات حفره آبستگي و توپوگرافی بستر بررسی شده است. با توجه به عملکرد نسبتاً خوب این سازه‌ها در اصلاح الگوی جریان‌های محلی و کنترل فرسایش، بررسی پارامترهای مختلف ازجمله تأثیر ساختار این صفحات بر الگو و مشخصات میدان جریان متلاطم به منظور یافتن طراحی بهینه و چندمنظوره این سازه‌ها برای اهداف مختلف ازجمله ایجاد زیستگاه‌های ساحلی، کنترل عمق جریان و ... ضروری است. از طرف دیگر، مطالعات آزمایشگاهی مربوط به بررسی مشخصات میدان جریان متلاطم با توجه به کمبود یا محدودیت‌های ابزارهای اندازه‌گیری سرعت، تنش و ... جامع نبوده و لزوم پژوهش بیشتر همچنان احساس می‌شود. هدف اصلی در تحقیق حاضر، بررسی تأثیر حالت‌های مختلف هندسی و میزان نفوذپذیری صفحات متصل به ساحل بر الگو و مشخصات میدان جریان با استفاده از مدل گرداب‌های بزرگ است که انتخاب این مدل عددی عموماً با توجه به دقت زیاد آن در شبیه‌سازی گردابه‌ها و جریان‌ات چرخشی نواحی پایین‌دست به‌واسطه مدل‌های مقیاس زیرشبکه و همگرایی سریع‌تر روند حل معادلات جریان بوده است. همچنین در تحقیق حاضر کفایت تعداد شبکه‌بندی اعمال‌شده برای شبیه‌سازی میدان جریان آشفته با استفاده از معیار انرژی جنبشی آشفته محاسبه شده در میدان جریان، ارزیابی شده است.

## مواد و روش‌ها

مدل عددی گرداب‌های بزرگ و معادلات حاکم بر آن به‌طور کلی اندرکنش گردابه‌ها (ادی‌ها) در میدان جریان عامل اصلی ایجاد تلاطم یا آشفتگی است. حل یا مدل‌سازی این گردابه‌ها با توجه به طیف وسیع مقیاس‌های طولی و زمانی آن‌ها، برای حل معادلات ناویر-استوکس و در نهایت شبیه‌سازی جریان‌های متلاطم ضروری است. یکی از روش‌های شبیه‌سازی جریان متلاطم در دینامیک سیالات محاسباتی، مدل گرداب‌های بزرگ است. در این مدل عددی، حل یا مدل‌سازی گردابه‌ها با ابعاد مختلف به‌واسطه معادلات اضافی با عنوان معادلات فیلترشده صورت می‌گیرد؛ بنابراین تغییراتی در معادلات ناویر-استوکس ایجاد می‌شود. معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس حاکم بر جریان‌های تراکم‌ناپذیر به شرح معادلات (۱) و (۲) است:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + v \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + 2v \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{S}_{ij} \quad (2)$$

در معادله (۲)،  $\bar{p}$  میدان فشار فیلترشده و  $\bar{S}_{ij}$  تانسور نرخ کرنش است که در مکانیک سیالات معیاری برای توصیف نحوه تغییر سرعت جریان در نقاط مختلف ناحیه محاسباتی است. برای حل کامل معادله (۲)، عبارت غیرخطی فیلترشده  $\bar{u}_i \bar{u}_j$  باید مدل‌سازی شود؛ بنابراین می‌توان نوشت (لئونارد، ۱۹۷۵):

$$\bar{u}_i \bar{u}_j = \tau_{ij} + \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (3)$$

در معادله بالا،  $\tau_{ij}$  تانسور تنش است. در نهایت معادله ناویر-استوکس را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\rho \partial x_i} + 2v \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{S}_{ij} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

در مدل گرداب‌های بزرگ، تانسور تنش توسط مدل‌های مختلف مقیاس زیرشبکه محاسبه و مدل‌سازی می‌شود. در تحقیق حاضر، از مدل اسماگورینسکی-لایلی که بر مبنای مفهوم لزجت گردابه‌ای است، استفاده شده که معادلات کلی آن به شرح زیر است (اسماگورینسکی، ۱۹۶۳):

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2(C_s \Delta)^2 |\bar{S}| S_{ij} \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho (C_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (6)$$

$$\bar{S} = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (7)$$

در معادلات بالا،  $C_s$  ثابت اسماگورینسکی-لایلی است که عموماً مقدار آن  $0.1-0.2$  در نظر گرفته می‌شود.  $\mu_t$  لزجت آشفتگی،  $\rho$  و  $\Delta$  هم به ترتیب چگالی و ابعاد شبکه محلی هستند.

## تحلیل ابعادی

بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در پدیده‌های هیدرولیکی توسط تحلیل ابعادی و استخراج اعداد بدون بعد صورت می‌گیرد. در تحقیق حاضر، پارامترهای مؤثر به شرح زیر بوده و با در نظر گرفتن  $H$ ،  $V$  و  $\rho$  به‌عنوان متغیرهای تکراری، معادلات کلی به شرح زیر هستند:

$$f(\rho, \mu, g, H, Z, V, \tau_0, \theta, P, L, B, S_0) = 0 \quad (8)$$

$$f\left(\frac{\mu}{\rho V H}, \frac{Hg}{V^2}, \frac{Z}{H}, \frac{\tau_0}{\rho V^2}, \theta, P, \frac{L}{H}, \frac{B}{H}, S_0\right) = 0 \quad (9)$$

$$f(Re, Fr, \frac{Z}{H}, \frac{\tau_0}{\rho V^2}, \theta, P, \frac{L}{H}, \frac{B}{H}, S_0) = 0 \quad (10)$$

پارامترهای مؤثر در معادله (۸) به ترتیب، جرم مخصوص، لزجت دینامیکی، شتاب ثقل، عمق جریان، فاصله از بستر، سرعت متوسط، تنش برشی بستر، زاویه صفحات مثلثی، نفوذپذیری و طول صفحات، عرض کانال و شیب بستر هستند. با حذف پارامترهای ثابت و نیز عدد رینولدز که در شرایط جریان متلاطم بدون تأثیر است، در نهایت می‌توان نوشت:

$$f(Fr, \frac{Z}{H}, \frac{\tau_0}{\rho V^2}, \theta, P) = 0 \quad (11)$$

## محدوده محاسباتی و جزئیات صفحات متصل به

## ساحل

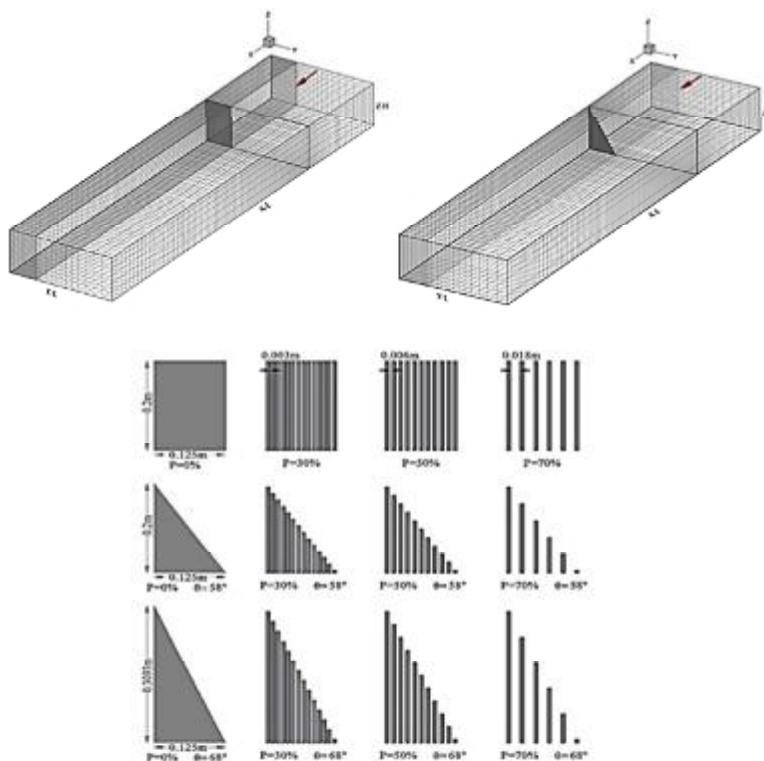
محدوده محاسباتی که شامل یک کانال مستطیلی مستقیم و صفحات متصل به ساحل غیرمستغرق با حالت‌های مختلف هندسی و میزان نفوذپذیری است، با استفاده از نرم‌افزار گمبیت (نسخه ۴.۲) طراحی و شبکه‌بندی شده است. طول مؤثر صفحات متصل به ساحل و عرض کانال مستطیلی در مدل عددی و آزمایشگاهی به ترتیب  $0.125$  و  $0.5$  متر در نظر گرفته شده است. طول کانال مستطیلی در مدل عددی برای کاهش زمان شبیه‌سازی سه‌بعدی میدان جریان، کاهش یافته است. به‌طور کلی میزان تنگ‌شدگی ایجادشده توسط صفحات متصل به ساحل  $25$  درصد بوده و حالت نفوذپذیری صفحات متصل به ساحل

مورد مطالعه به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ ارائه شده است. به طور کلی فاصله طولی از صفحات متصل به ساحل، فاصله عرضی از دیواره کانال، فاصله از بستر، طول مؤثر صفحات متصل به ساحل و میزان نفوذپذیری به ترتیب با  $X, Y, Z, L$  و  $P$  مشخص شده است.

با در نظر گرفتن میله‌هایی به قطر  $0.06$  متر با فواصل مختلف ایجاد شده است. مشخصات هیدرولیکی جریان حاکم در مدل عددی و آزمایشگاهی، شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی میدان جریان حول صفحات متصل به ساحل و نیز ابعاد و مشخصات کلی صفحات

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی جریان حاکم و شرایط مرزی

مشخصات هیدرولیکی	عمق جریان (متر) Flow Depth (m)	سرعت نزدیک شونده (متر بر ثانیه) Approach Velocity (m/s)	عدد فرود Fr	عدد رینولدز Re
	۰/۱۵	۰/۶۶	۰/۵۴	۶۱۸۷۵
شرایط مرزی	ورودی کانال Pressure inlet	دیواره‌ها، بستر و صفحات متصل به ساحل Wall	سقف کانال Pressure inlet	خروجی کانال Pressure outlet



شکل ۱- محدوده محاسباتی، ابعاد و مشخصات کلی صفحات مورد مطالعه

نوسانات سطح آب، سه مقطع عرضی  $0.44/3, 0.92/1, 0.96/0$  در نظر گرفته شده است. به طور کلی با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل ۲، نوسانات شدید سطح آب در نزدیکی صفحه متصل به ساحل غالباً ناشی از تغییرات فشار و سرعت در این ناحیه بوده و در نهایت با کاهش تأثیر این سازه بر میدان جریان، تغییرات پروفیل سطح آب نیز کاهش می‌یابد. بر اساس مقایسه مقادیر پروفیل سطح آب به دست آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی، خطای

### صحت‌سنجی مدل عددی گرداب‌های بزرگ

اندازه‌گیری پروفیل سطح آب حول صفحه متصل به ساحل مستطیلی شکل با نفوذپذیری ۳۰ درصد در محدوده  $1/6 \leq X/L \leq 1/6$ ، در یک کانال مستقیم به طول ۱۰ متر و عرض ۰/۵ متر و تحت شرایط هیدرولیکی و هندسی ذکر شده در جدول ۱ و شکل ۱ و با استفاده از عمق سنج نقطه‌ای با دقت  $\pm 0.1$  میلی‌متر انجام شده است. برای بررسی تأثیر حضور صفحه متصل به ساحل بر

$$K_{res} = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (13)$$

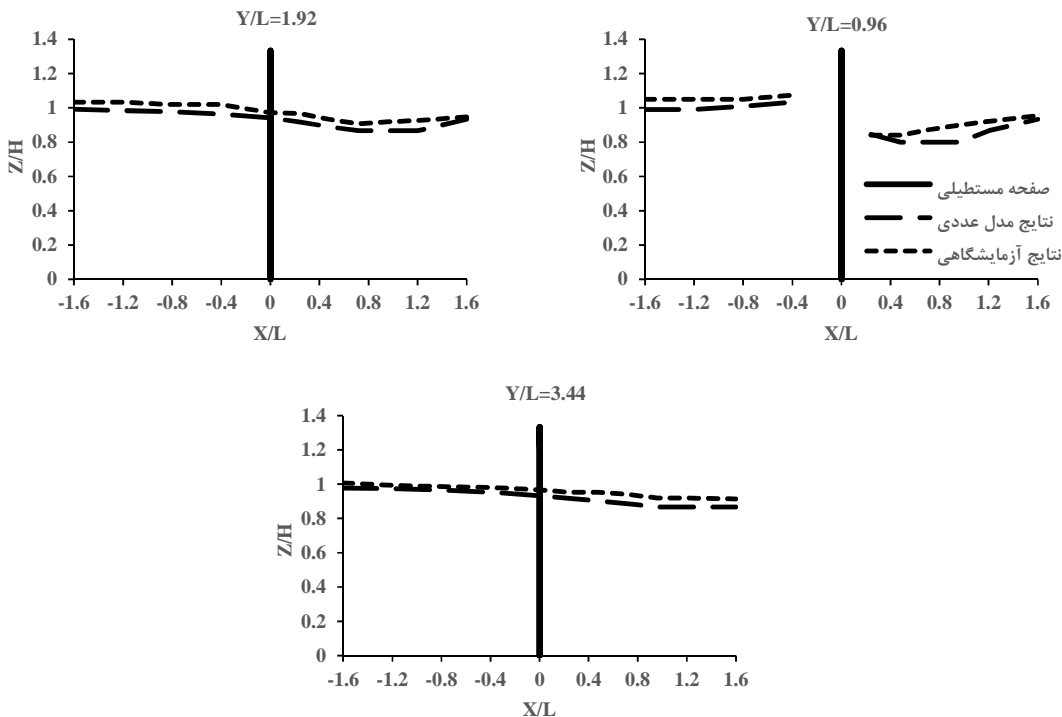
$$K_{sgs} = \left(\frac{\mu_{sgs}}{\rho C_s \Delta}\right)^2 \quad (14)$$

$K_{res}$  و  $K_{sgs}$  به ترتیب انرژی جنبشی آشفته محاسبه شده و انرژی جنبشی آشفته مقیاس زیر شبکه هستند. در این تحقیق با توجه به برقراری معادله مذکور و نیز براساس نتایج ارائه شده در جدول ۲، حدوداً ۱۵۰۰۰۰ شبکه بر مدل‌ها برای شبیه‌سازی میدان جریان حول صفحات متصل به ساحل اعمال شده است، اما باید توجه داشت که در حالت‌های نفوذپذیر، ایجاد دقیق این تعداد شبکه با توجه به هندسه این سازه‌ها امکان‌پذیر نیست.

نسبی حدوداً ۵ درصد است که با توجه به آن می‌توان نتیجه گرفت میدان جریان متلاطم حول صفحات متصل به ساحل توسط مدل عددی گرداب‌های بزرگ با دقت قابل‌قبولی شبیه‌سازی می‌شود.

تعیین تعداد شبکه‌های محدوده محاسباتی با توجه به ماهیت سه‌بعدی مسئله، اهمیت تطابق نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی و نیز کاهش مدت زمان محاسبات ضروری است. در مدل گرداب‌های بزرگ براساس معیار انرژی جنبشی آشفته محاسبه شده در میدان جریان، کفایت تعداد شبکه‌بندی محدوده محاسباتی ارزیابی می‌شود که معادلات آن به شرح زیر می‌باشد:

$$\frac{K_{res}}{K_{res} + K_{sgs}} > 0.8 \quad (12)$$



شکل ۲- مقایسه مقادیر پروفیل سطح آب به دست آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی

### نتایج و بحث

الگو و مشخصات میدان جریان تحت تأثیر حالت‌های مختلف هندسی و میزان نفوذپذیری صفحات متصل به ساحل دچار تغییراتی می‌شوند که شدت این تغییرات در نواحی نزدیک به سازه، بیشتر است. به‌طور کلی با توجه به اهمیت نواحی نزدیک بستر و تأثیر گردادبان سرعت و گردابه‌های ایجاد شده در این ناحیه بر لایه‌های فوقانی میدان جریان، پارامترهایی نظیر سرعت دماغه، بیشینه و

جدول ۲- میانگین خطای نسبی مقادیر عددی و آزمایشگاهی پروفیل سطح آب حول صفحه متصل به ساحل مستطیلی شکل با نفوذپذیری ۳۰ درصد

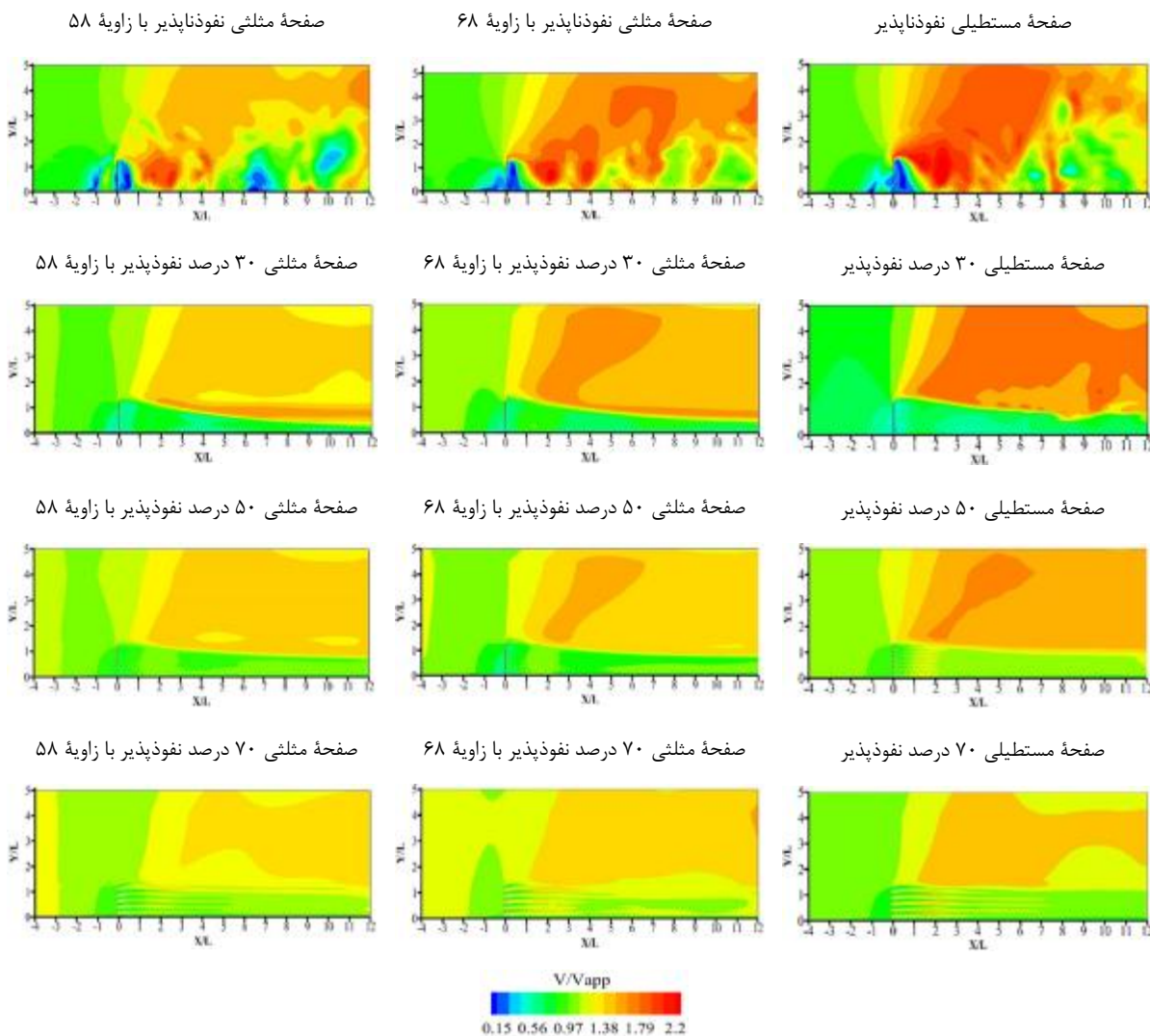
تعداد شبکه Mesh	خطای نسبی (%) Relative Error (%)
۱۰۲۰۰۰	۷/۱۸
۱۵۰۰۰۰	۵/۱۹
۲۰۰۲۰۰	۵/۱۸

می‌دهد. در ناحیه پایین دست همه صفحات متصل به ساحل نفوذناپذیر، گرداب و جریانات چرخشی نسبتاً شدید و پایدار تشکیل می‌شود. در حالی که در حالت‌های نفوذپذیر، دنباله‌های ضعیفی که عمدتاً ناشی از جداسازی جریان هستند، تشکیل می‌شوند.

در همه صفحات متصل به ساحل، جریانات چرخشی شدید عمدتاً در محدوده  $0 \leq X/L \leq 3$  پایین دست رخ داده است که در حالت‌های نفوذپذیر، ناحیه چرخشی عمدتاً شامل دنباله‌ها و گردابه‌های ضعیف بوده و نزدیک صفحات تشکیل می‌شود.

برآیند سرعت در لایه  $Z/H = 0.3$  (نزدیک بستر) بررسی شده است.

کانتورهای برآیند سرعت در شکل ۳ نشان داده شده است. براساس این نمودارها می‌توان گفت در اثر کاهش عرض کانال توسط صفحات متصل به ساحل و نیز اثرات موضعی این سازه‌ها، میدان جریان به دو ناحیه شامل میدان جریان اصلی و ناحیه جریان چرخشی تقسیم می‌شود، در مرز این دو ناحیه نیز جریان متلاطمی با عنوان جریان لایه برشی شکل می‌گیرد. به‌طور کلی اندرکنش گردابه‌های مختلف در این نواحی، الگو و مشخصات جریان را تحت‌تأثیر قرار

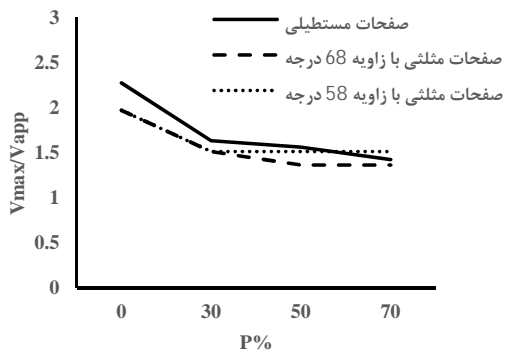


شکل ۳- کانتورهای برآیند سرعت حول صفحات غیرمستغرق مستطیلی و مثلثی

کاهش می‌یابد، همچنین با افزایش زاویه صفحات نفوذناپذیر متصل به ساحل ( $\theta$ ) از ۵۸ به ۹۰ درجه، سرعت دماغه  $1/2$  برابر می‌شود. نسبت سرعت بیشینه

به‌طور کلی با افزایش میزان نفوذپذیری صفحات متصل به ساحل، تلاطم و تغییرات ایجادشده در میدان جریان هم‌چون سرعت دماغه ( $V_{tip}$ ) و سرعت بیشینه ( $V_{max}$ )

کاهش می‌یابد. روند تغییرات سرعت دماغه و سرعت بیشینه در شکل ۴ نشان داده شده است.

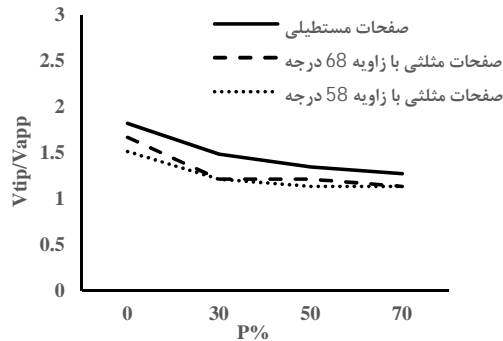


شکل ۴- تغییرات سرعت دماغه و سرعت بیشینه حول صفحات متصل به ساحل

شده است. این پژوهشگران میدان جریان را به صورت آزمایشگاهی توسط سرعت‌سنج صوتی و روش سرعت‌سنجی تصویری بررسی کرده‌اند. به‌طور کلی روند تغییرات نسبت سرعت دماغه به سرعت نزدیک‌شونده و زاویه انحراف جریان در هر دو تحقیق مشابه هم بوده و اختلاف در مقادیر پارامترهای مذکور ناشی از شرایط هیدرولیکی، هندسی و ساختاری سازه‌ها است.

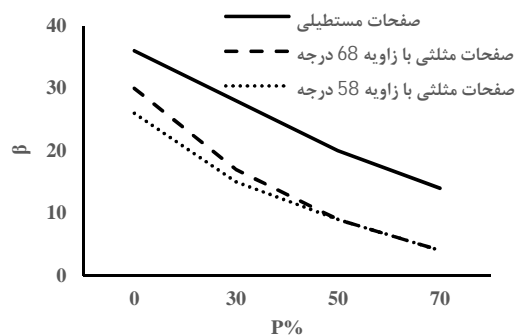
نتایج مربوط به تنش برشی بستر در شکل ۶ و جدول ۴ ارائه شده است. به‌طور کلی با نزدیک‌شدن به محدوده صفحات متصل به ساحل، تحت‌تأثیر افزایش سرعت موضعی ناشی از جریان‌های عرضی، انحراف جریان در اثر کاهش عرض کانال و نیز اندرکنش گردابه‌های نعل‌اسبی تنش برشی بستر به‌صورت قابل‌توجهی افزایش یافته و در همه حالت‌ها، ناحیه پرتنش در پایین‌دست این سازه‌ها گسترش یافته و بیشینه تنش برشی بستر در مقطع ۲/۴  $X/L =$  اتفاق افتاده است. در نمودارهای ارائه‌شده، بی‌بعدسازی تنش برشی بستر با استفاده از  $\tau_{Mean}$  که متوسط تنش برشی بستر در ابتدای کانال در حالت صفحه مستطیلی نفوذناپذیر است، انجام شده است؛ البته در همه حالت‌های نفوذناپذیر بیشینه تنش برشی تاحدودی در نزدیکی دیواره کانال (سمت قرارگیری صفحات مستطیلی و مثلثی) بوده و با افزایش میزان نفوذپذیری موقعیت آن جابه‌جا می‌شود.

$(V_{max}/V_{app})$  به‌طور متوسط از ۲/۰۷ برای همه صفحات نفوذناپذیر به ۱/۴۳ برای صفحات با نفوذپذیری ۷۰ درصد



شکل ۵- تغییرات زاویه انحراف جریان

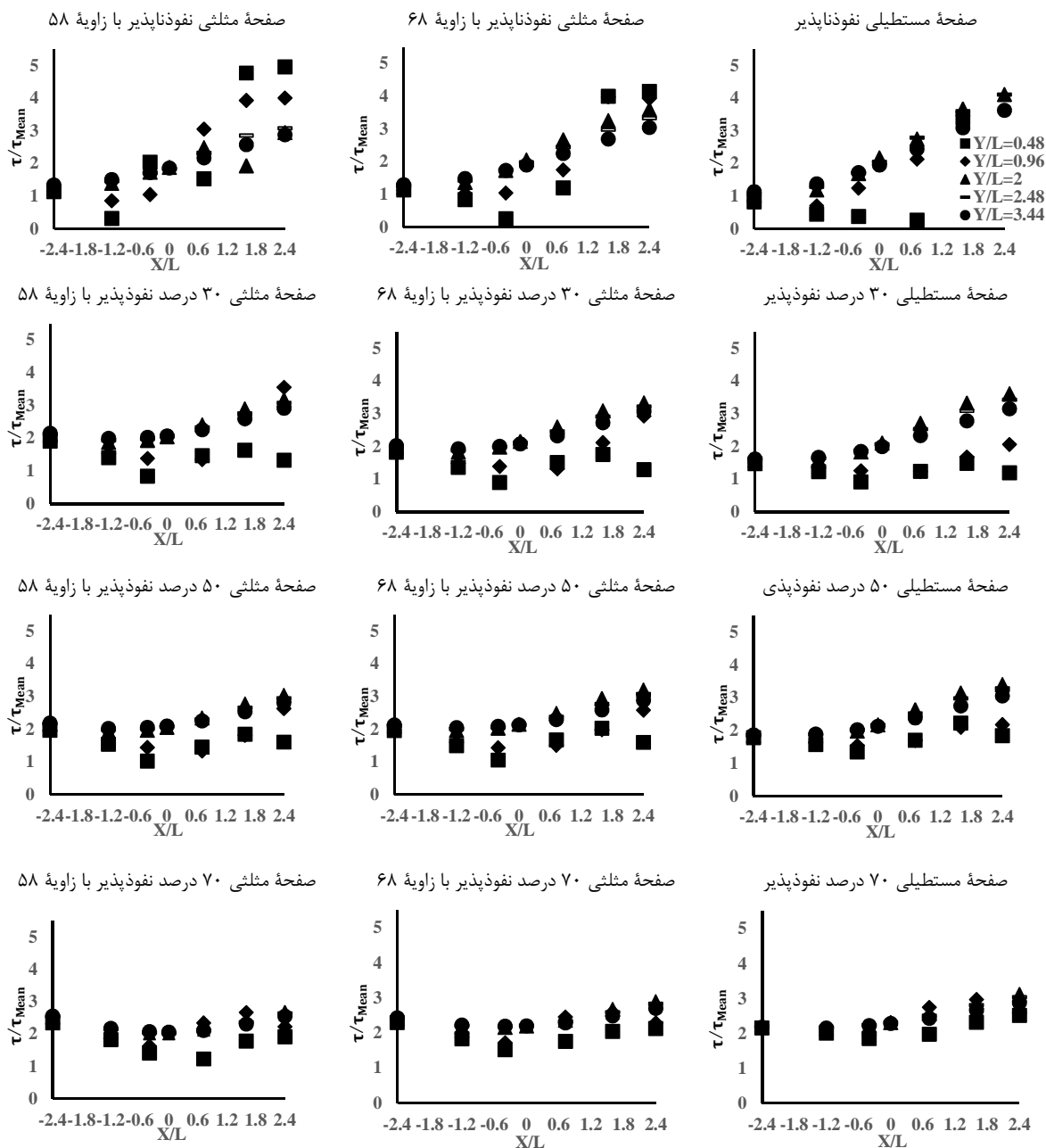
به‌طور کلی صفحات متصل به ساحل در حالت‌های مختلف هندسی و نفوذپذیری با انحراف جریان حاکم، میدان جریان اصلی و نیز موقعیت خط‌القعر رودخانه‌ها را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند. تغییرات زاویه انحراف جریان ( $\beta$ ) در لایه  $Z/H = 0.33$  بررسی شده است و نتایج آن در شکل ۵ ارائه شده است. به‌طور کلی صفحات متصل به ساحل مثلثی‌شکل انحراف کمتری نسبت به صفحات مستطیلی در جریان حاکم ایجاد می‌کنند. با افزایش میزان نفوذپذیری، به‌خصوص در صفحات با نفوذپذیری ۷۰ درصد می‌توان گفت انحراف جریان خیلی جزئی بوده و این سازه‌ها تأثیری در کنترل و کاهش سرعت ندارند.



نتایج تحقیق حاضر با نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق کانگ و همکاران (۲۰۱۱) مقایسه شده که در جدول ۳ نشان داده

جدول ۳- مقایسه نتایج  $V_{tip}/V_{app}$  و  $\beta$  تحقیق حاضر با تحقیق کانگ و همکاران (۲۰۱۱)

$\beta$	$V_{tip}/V_{app}$	سرعت نزدیک شونده (متر بر ثانیه)	عمق جریان (متر)	روش	نوع سازه	
۳۷/۹	۱/۵۲				آبشکن مستطیلی ۰٪	کانگ و همکاران (۲۰۱۱)
۲۰/۹	۱/۲۵	0/4	0/15	ADV	آبشکن مستطیلی ۴۰٪	
۱۳/۶	۱/۲۰			LSPIV	آبشکن مستطیلی ۶۰٪	
۸/۵	۱/۱۲				آبشکن مستطیلی ۸۰٪	
۳۶	۱/۸۴				صفحه مستطیلی ۰٪	تحقیق حاضر
۲۸	۱/۴۹	0/66	0/15	LES	صفحه مستطیلی ۳۰٪	
۲۰	۱/۳۵				صفحه مستطیلی ۵۰٪	
۱۴	۱/۲۸				صفحه مستطیلی ۷۰٪	



شکل ۶- تغییرات تنش برشی بستر حول صفحات مستطیلی و مثلثی



جدول ۴- تغییرات بیشینه تنش برشی بستر در صفحات متصل به ساحل با نفوذپذیری ۷۰ درصد نسبت به حالت‌های نفوذناپذیر

میزان کاهش (%)	صفحه مستطیلی	صفحه مثلثی با زاویه ۶۸ درجه	صفحه مثلثی با زاویه ۵۸ درجه
	۵۳/۲۰	۳۰/۳۳	۴۵/۶۱

## نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر برای درک رفتار و نحوه عملکرد صفحات متصل بر ساحل، تأثیر حالت‌های مختلف هندسی و میزان نفوذپذیری این سازه‌ها بر الگوی جریان متلاطم بررسی شده است. براساس نتایج به دست آمده، صفحات متصل به ساحل نفوذناپذیر بیشترین تغییرات را در الگو و مشخصات میدان جریان متلاطم ایجاد می‌کنند. به‌طور کلی با افزایش میزان نفوذپذیری صفحات، ناحیه جریان چرخشی در پایین دست این سازه‌ها تشکیل نشده و بیشتر دنباله‌ها و گردابه‌های ضعیف دقیقاً بعد از عبور جریان از فواصل بین میله‌ها ایجاد می‌شود. میزان کاهش سرعت دماغه در صفحات مستطیلی، مثلثی با زاویه ۶۸ و ۵۸ درجه با میزان نفوذپذیری ۷۰ درصد به ترتیب ۳۰، ۳۱/۸ و ۲۵ درصد است. به‌طور کلی سرعت دماغه و بیشینه سرعت با افزایش میزان نفوذپذیری صفحات متصل به ساحل کاهش می‌یابند. با توجه به جابه‌جایی موقعیت بیشینه تنش برشی بستر به نزدیکی محور مرکزی کانال در صفحات نفوذپذیر، می‌توان نتیجه گرفت که این نوع از سازه‌ها عملکرد بهتری در حفاظت از نواحی بحرانی بستر و سواحل دارند. همچنین مقادیر بیشینه تنش بستر به‌طور متوسط در میدان جریان حول صفحات مستطیلی و مثلثی شکل به ترتیب ۴/۱۹ و ۳/۴۷ برابر  $\tau_{Mean}$  هستند. در نهایت به‌طور کلی می‌توان گفت که با توجه به هندسه صفحات متصل به ساحل مثلثی شکل و براساس مقادیر و روند تغییرات سرعت دماغه، سرعت بیشینه، زاویه انحراف جریان و نیز تغییرات بیشینه تنش برشی بستر نسبت به  $\tau_{Mean}$ ، تأثیر این سازه‌ها بر میدان جریان در مقایسه با صفحات مستطیلی شکل کمتر است.

## منابع

- the bank. Journal of Hydro-environment Research. 10: 64-75.
- Bhuiyan F. Hey R. D. and Wormleaton P. R. 2010. Bank-attached vanes for bank erosion control and restoration of river meanders. Journal of Hydraulic Engineering. 136(9): 583-596.
- Brevis W. Garcia-Villalba M. and Nino Y. 2014. Experimental and large eddy simulation study of the flow developed by a sequence of lateral obstacles. Environmental Fluid Mechanics. 14(4): 873-893.
- Duan J. He L. Fu X. and Wang Q. 2009. Mean flow and turbulence around an experimental spur dike. Advances in Water Resources. 32(12): 1717-1725.
- Ettema R. and Muste M. 2004. Scale effects in flume experiments on flow around a spur dike in flat bed channel. Journal of Hydraulic Engineering. 130(7): 635-646.
- Fang H. Bai J. He G. and Zhao H. 2014. Calculations of nonsubmerged groin flow in a shallow open channel by large-eddy simulation. Journal of Engineering Mechanics. 140(5).
- Ferro V. Shokriani Hajibehzad M. Shafai Bejestan M. and Kashefipour S.M. 2019. Scour around a permeable groin combined with a triangular vane in river bends. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 145(3).
- Kang J. Yeo H. Kim S. and Ji U. 2011. Permeability effects of single groin on flow characteristics. Journal of Hydraulic Research. 49(6): 728-735.
- Leonard A. 1975. Energy cascade in large-eddy simulations of turbulent fluid flows. Advances in Geophysics. 18: 237-248.
- McCoy A. Constantinescu G. and Weber L. 2008. Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel with series of groynes. Journal of Hydraulic Engineering. 134(2): 157-172.
- Smagorinsky J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations I. The basic experiment. Month. Wea. Rev. 91(3): 99-164.
- Teraguchi H. Nakagawa H. Kawaike K. Baba Y. and Zhang H. 2011. Effects of hydraulic structures on river morphological process. International Journal of Sediment Research. 26(3): 283-303.
- Tingsanchali T. and Maheswaran S. 1990. 2-D depth-averaged flow computation near groyne. Journal of Hydraulic Engineering. 116(1): 71-86.
- Abdou S. S. ElMoustafa A. M. and Samy M. 2021. Assessing flow bends in open channels. International Research Journal of Advanced Engineering and Science. 6(2): 49-54.
- Bahrami Yarahmadi M. Shafai and Bejestan M. 2015. Sediment management and flow patterns at river bend due to triangular vanes attached to

15. Wang W. Liao W. and Qi L. 2020. Experiment of turbulent characteristics of flow in wide and narrow channels. *Advances in Water Science*. 31(3): 394-403.
16. Xuelin T. Xiang D. and Zhicong C. 2006. Large eddy simulations of three-dimensional flows around a spur dike. *Tsinghua Science and Technology*. 11(1): 117-123.
17. Zaghoul N. A. 1974. Analytical and experimental investigation of flow around a spur dike. Ph.D. dissertation, Univ. of Windsor, Windsor, ON, Canada.
18. Zhou Y. 2001. Large-eddy simulation of 3-D flow motion around submerged spur dike. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*. 18(5): 28-36.