

## مطالعه عددی اثر اندرکنش پایه پل و تکیه‌گاه مستطیلی بر خصوصیات جریان

سمیه انجم‌روز<sup>۱</sup>، حجت کرمی<sup>۲</sup>، خسرو حسینی<sup>۳</sup>، سعید فرزین<sup>۴</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۰۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۱۷

### چکیده

یکی از مسائل مهم در طراحی پل‌ها، بررسی اثر مجاورت تکیه‌گاه و پایه پل بر خصوصیات جریان پیرامون آنها است. در تحقیق حاضر از نرم‌افزار Flow-3D برای مدل‌سازی عددی در یک کانال مستطیلی شامل یک تکیه‌گاه مستطیلی در دو وضعیت حضور تک‌پایه و جفت‌پایه استوانه‌ای استفاده شده است. جهت صحت‌سنجی این پژوهش، مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان پیرامون تکیه‌گاه و پایه پل از نتایج دو آزمایش معتبر استخراج شد. پس از مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و عددی، مدل RNG برای تکیه‌گاه و پایه پل به ترتیب با داشتن ضریب تعیین (۰/۹۶۳۴) و  $(R^2 = ۰/۸۷۰۷)$  نسبت به دو مدل آشفتگی K-e و Les از عملکرد بهتری برخوردار بود. برخی خصوصیات جریان، شامل انرژی آشفتگی و تنش برشی بستر بررسی شدند. افزایش انرژی آشفتگی جریان نسبت به مدل شاهد در هر دو مدل شامل تکیه‌گاه مستطیلی در مجاورت تک‌پایه و جفت‌پایه، یکسان و ۳ برابر به دست آمد. همچنین افزایش پارامتر تنش برشی بستر نسبت به مدل شاهد در مدل شامل تکیه‌گاه مستطیلی در مجاورت تک‌پایه بیشینه و ۴ برابر برآورد شد. بررسی پارامتر فاصله بین دو سازه تکیه‌گاه مستطیلی و پایه پل با لحاظ مدل شاهد و نتیجه کارهای قبلی محققین نشان داد که فاصله نزدیک از ایمنی خوبی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: پایه پل، تکیه‌گاه مستطیلی، اندرکنش، خصوصیات جریان، مدل‌سازی عددی

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۰۹۱۲۸۰۹۶۸۱۱ [s.anjomrooz@semnan.ac.ir](mailto:s.anjomrooz@semnan.ac.ir)

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۰۹۱۲۴۸۰۳۳۵۰ [hkarami@semnan.ac.ir](mailto:hkarami@semnan.ac.ir) (نویسنده مسئول)

<sup>۳</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۰۹۱۲۱۴۰۴۵۲۳۰ [khhoseini@semnan.ac.ir](mailto:khhoseini@semnan.ac.ir)

<sup>۴</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۰۹۱۷۴۱۱۲۸۹۱ [saeed.farzin@semnan.ac.ir](mailto:saeed.farzin@semnan.ac.ir)

## مقدمه

طراحی، محاسبه و احداث پایه و تکیه‌گاه پل از حساس‌ترین مراحل یک پروژه پل‌سازی می‌باشند. لذا طراح باید برای انتخاب نوع پایه و تکیه‌گاه، اطلاعات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی حوضه و رودخانه را در نظر گرفته و مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد. مطالعات در خصوص شناخت سازوکار آبشستگی اطراف سازه‌های هیدرولیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به اهمیت ساخت اصولی اجزای پل‌ها شامل پایه و تکیه‌گاه آن‌ها و بررسی شرایط جریان و آبشستگی حول پایه و تکیه‌گاه، مطالعه اندرکنش این دو سازه امری ضروری است. مدل‌سازی پایه و تکیه‌گاه پل در کنار هم کمک می‌کند تا با صرف هزینه و زمان کمتر، عملکرد این سازه‌ها مورد بررسی قرار گیرند. به دلیل حضور پایه و تکیه‌گاه در کنار هم، یک سامانه سه بعدی جریان گردابی در اطراف آن‌ها تولید شده که باعث جدا شدن دانه‌ها از بستر و آبشستگی موضعی می‌شود. این نوع الگوی جریان به دلیل هم‌جواری دو سازه پایه و تکیه‌گاه پل و پیچیده بودن جریان‌های ایجاد شده دارای اهمیت زیادی می‌باشد.

در مورد پیشینه مطالعات بر روی سازه تکیه‌گاه پل، در سال ۲۰۱۵ بررسی پیشینه عمق آبشستگی حول تکیه‌گاه قائم، دیوار باله‌ای و نیم‌دایروی به صورت آزمایشگاهی با ۱۴۰۰ داده صورت گرفت. نتایج نشان داد که ۹۰-۷۰ درصد از آبشستگی در همان زمان ۲۰ درصد اولیه اتفاق می‌افتد. همچنین معیار همبستگی در تحلیل عددی جریان برگشتی و شعاعی ANN و نیز ANFIS به ترتیب ۰/۹۶، ۰/۹۴ و ۰/۹۸ برآورد شد که نشان داد نتیجه ANFIS از دیگری بهتر می‌باشد (Hosseini et al. 2016).

در مطالعه‌ای دیگر، تنش‌های آشفتگی در سطح زیرین اطراف یک تکیه‌گاه دیوار باله‌ای ۴۵ درجه برآورد شد. دو موضوع آزمایشگاهی آبشستگی موضعی و نیز پایداری پوشش سنگ‌چین محور این پژوهش بود. یکی از نتایج این بود که پیشینه عمق آبشستگی تکیه‌گاه با کاهش ارتفاع بستر در طی فرسایش، اتفاق می‌افتد. این عمق پیشینه به کمک معادله کانداسامی و ملویل قابل برآورد بود (Kandasamy and Melville, 2010).

در مورد تحقیقات صورت گرفته بر روی سازه پایه پل، کیم و همکاران آبشستگی موضعی حول پایه‌های استوانه‌ای شکلی که دوبه‌دو در کنار هم و نیز حالتی را که پشت سر هم قرار گرفته بودند، تحت شرایط آب زلال به صورت عددی بررسی کردند. پژوهش آن‌ها به این موضوع منتج گردید که اگرچه در حالت جای‌گیری دو پایه پشت سرهم، با افزایش فاصله بین پایه‌ها، عمق آبشستگی پیشینه در ابتدا تمایل به زیاد شدن دارد و پس از آن و در آن سوی نقطه پیشینه به تدریج کاهش می‌یابد اما با کاهش فاصله بین دو پایه، در حالت جای‌گیری دو پایه در جوار هم، حداکثر عمق آبشستگی افزایش پیدا می‌کند. نتایج محاسبات مدل‌سازی انجام گرفته توسط آن‌ها در قیاس با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی قبلی، مطابقت خوبی را دربرداشت (Kim et al. 2014).

در سال ۲۰۱۲، نتایج آزمایشگاهی الگوی جریان حول دو پایه جای‌گیری شده در جوار هم ارائه گردید. آزمایش‌ها برای دو نوع بستر فرسایش‌پذیر و صلب یا به عبارتی وضعیت‌های با و بدون حفره آبشستگی انجام شد. ماحصل این پژوهش گویای این بود که جریان بین دو پایه به سمت حفره آبشستگی شتاب گرفته و در نتیجه جهت‌گیری طولی و عرضی جریان را حول و به خصوص بین دو پایه تحت تأثیر قرار می‌دهد و نیز بزرگی جریان و مقدار انرژی جنبشی آشفتگی بین دو پایه بزرگتر از بخش بیرونی دو پایه برآورد شد. همچنین تنش برشی بستر بین دو پایه اساساً مقدار بزرگی است و در این‌جا دو برابر مقدارش در نواحی بیرونی دو پایه به دست آمد (Ataie and Aslani 2012).

حسن زاده و همکاران، الگوی جریان اطراف پایه‌هایی با مقاطع دایره، دوکی، بیضی، مستطیلی، مربعی و مستطیلی گردگوشه (مستطیل-دایره) را به صورت سه‌بعدی، با استفاده از نرم افزار FLUENT شبیه‌سازی کردند. نتیجه محاسبات آن‌ها گویای این بوده که مقطع دوکی و بیضی شکل بهترین نوع مقطع در کاهش تنش برشی و در نتیجه کاهش آبشستگی اطراف پایه می‌باشد. با بررسی نتایج به دست آمده، برای مقاطع مختلف مشاهده کردند که با افزایش طول مقاطع از طول گرداب‌ها کاسته شده به طوری که این مقادیر در مقطع ترکیبی (مستطیل-دایره) نسبت به مستطیل و مربع کمتر می‌باشد (حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۰).

به منظور بررسی اندرکنش دو سازه پایه و تکیه‌گاه پل نیز، مطالعات محدودی انجام شده است؛ در

پایه‌های پل (تک و جفت پایه) را به دست آورد. همچنین بهترین مدل انتقال آشفتگی جهت مدل‌سازی عددی این نوع سازه ادغامی با توجه به نتایج به‌دست‌آمده ارائه می‌شود.

## مواد و روش‌ها

### معادلات حاکم

یکی از روش‌های رایج در شبیه‌سازی رفتار سیال در سازه‌های آبی استفاده از روش‌های عددی است. این روش‌ها که مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می‌باشند، کاربر را قادر می‌سازند تا ضمن به‌کارگیری معادلات حاکم بر میدان جریان، جریان سیال در محیط را نیز بررسی کند. نرم‌افزار مورد استفاده در این تحقیق، FLOW-3D، معادلات جریان استاندارد مانند ناپیراستوکس و معادلات پیوستگی جرم و اندازه حرکت برای هر روش محاسباتی را گسسته و حل می‌کند. یکی از قابلیت‌های عمده این برنامه برای آنالیز هیدرولیکی، توانایی مدل کردن جریان با سطح آزاد به روش حجم محدود VOF<sup>۱</sup> می‌باشد (Hirt and Nichols, 1981). در روش مذکور تابع  $F(x, y, t)$  تعریف می‌شود. تابع  $F$  به شکل رابطه (۱) بوده و مقدار آن بین صفر تا ۱ متغیر می‌باشد.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

برای حل معادله (۱) در سلولی که پر از آب است، مقدار تابع  $F$  برابر یک، در سلول خالی (پر از هوا) مقدار تابع برابر صفر و در سلول‌هایی که سطح آب وجود دارد این مقدار بین صفر و یک می‌باشد. مدل مذکور، به‌طور هم‌زمان معادله پیوستگی طبق رابطه (۲) و معادلات سه بعدی ناپیر-استوکس طبق رابطه (۳) را حل می‌کند.

سال ۲۰۱۱، اندرکنش دو سازه تکیه‌گاه پل و پایه مجاور آن در مرزی غیرچسبنده بر محوریت موضوع آبشستگی بررسی و عمق آبشستگی، محدوده آبشستگی و داده‌های عمق‌سنجی برای دو نوع تکیه‌گاه متداول دیوارباله‌ای و سرریزی تعیین شد. نتایج ترکیبات پایه و تکیه‌گاه نشان داد که حضور پایه منجر به افزایشی اساسی در مقدار عمق آبشستگی تکیه‌گاه نمی‌گردد، حتی چنان‌چه پایه در نزدیکی پنجه شیب سرریز یک تکیه‌گاه سرریزی باشد، عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد که این کاهش حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد می‌باشد. همچنین، حضور پایه در نزدیکی تکیه‌گاه دیوار باله‌ای، عمق آبشستگی تکیه‌گاه را کمتر از ۱۰ درصد افزایش داد. این افزایش با افزایش مقدار آشفتگی در اطراف پایه متناسب بود. (Oben and 2011) Ettema

در مورد سازه‌هایی چون پایه پل و تکیه‌گاه پل، هر یک به‌طور جداگانه، مطالعات چندی در خصوص آبشستگی این نوع سازه‌های آبی انجام پذیرفته است. ولی روش‌های عددی برای تحلیل و بررسی هیدرولیک جریان در حالت اندرکنش دو سازه پایه و تکیه‌گاه پل کمتر به‌کار گرفته شده است. از دلایل عمده این امر می‌توان به پیچیدگی جریان اعم از ایجاد جریان‌های گردابی و حالت آشفته جریان در بالادست و پایین‌دست این دو سازه اشاره کرد. از سوی دیگر، در پژوهش‌های آزمایشگاهی قبلی به‌علت پاره‌ای مشکلات و دشواری‌ها، برپایی زمینه انجام آزمایش مهیا نبوده و در مطالعات عددی، اغلب تعیین عمق آبشستگی پس از تخریب در اولویت بوده است. لذا در این پژوهش، به تحلیل و بررسی خصوصیات هیدرولیکی جریان ایجاد شده در شرایط مجاورت پایه و تکیه‌گاه پل پرداخته شده است. در این راستا، پارامترهای سرعت جریان، انرژی جنبشی آشفتگی جریان و تنش برشی بستر به همراه الگوی تغییرات آن‌ها به‌صورت سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D شبیه‌سازی شده و مورد تفسیر قرار گرفته است. مدل‌های آشفتگی مورد استفاده نیز شامل RNG، Les، و K-e می‌باشد. با استفاده از این تحقیق، می‌توان نتیجه اندرکنش دو سازه پایه و تکیه‌گاه مستطیلی پل در فاصله نزدیک بین آن‌ها با تعداد متغیر

<sup>1</sup> Volume of Fluid

سیال جریان یافته در هر سه مدل سازی و تمامی خواص فیزیکی آن در دمای ۲۹۳ کلوین می باشد. مدل تکیه گاه مستطیلی<sup>۱</sup> (V.) شکل (۱-الف) و نقاط اطراف آن شکل (۱-ج)، کانالی به طول ۱۰، عرض ۱ و ارتفاع ۰/۶ متر می باشد. در فاصله ۵/۷ متری از ابتدای کانال، یک تکیه گاه مستطیلی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۰/۳، ۰/۱۵ و ۰/۴ متر قرار گرفته است. در محدوده آزمایش، قطر میانگین ذرات بستر یا همان ضریب زبری کف کانال ۰/۰۰۰۹۱ متر می باشد (2007) Dey and Raikar. نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی برابر ۰/۸۵، ضریب یکنواختی ۱/۳۸، چگالی نسبی ۲/۶۵ و سرعت برشی بحرانی نیز ۰/۰۲۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده اند (Hosseini et al. 2016). باتوجه به عرض کانال و نیز عمق جریان، می توان سرعت متوسط را برابر با ۰/۳۱ متر بر ثانیه تخمین زد. در این آزمایش، تکیه گاه، کوتاه در نظر گرفته شده است ( $\frac{l_a}{y} \leq 1$ ) که در رابطه مذکور  $l_a$  عرض تکیه گاه و  $y$  عمق جریان است. بررسی ها در شرایط آبشستگی آب زلال انجام شده اند. شکل (۱-ج) نقاطی از جریان را نشان می دهد که با ارتفاع ثابت ۰/۰۵ متر و طول و عرض های مشخص به منظور صحت سنجی مدل تکیه گاه پل برداشت شده اند. برای اندازه گیری سرعت جریان در هر دو مدل سازی از سرعت سنج صوتی استفاده شد.

مدل پایه طبق شکل (۱-ب)، کانالی به طول ۱۰، عرض ۱/۲۶ و ارتفاع ۰/۹ متر می باشد. به فاصله تقریباً ۱۰ متری از ابتدای کانال، در محدوده ای ۲ متری از میانه کانال، حفره ای ایجاد شده که در داخل آن دو عدد پایه (جفت پایه استوانه ای همسان) به مجاورت هم و به فاصله مرکز تا مرکز برابر ۰/۲۷۳ متر قرار گرفته است. قطر و ارتفاع آن ها به ترتیب ۰/۰۹۱ و ۰/۹ متر می باشد. محدوده تقریباً ۱۰ متری ابتدای کانال به صورت بستر کاذب به ارتفاع ۰/۳۵ متر از کف کانال ساخته شده است. آب از مخزن قرار گرفته شده در سمت چپ پمپاژ شده، مسیری را به سمت راست طی می کند، سپس از دهانه ورودی به داخل کانال راه یافته و وارد چرخه آزمایش می شود. در محدوده آزمایش قطر

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_y) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho_\theta A_y) + \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \varepsilon \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_z \frac{\partial u}{\partial x} + g R A \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z^2 \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \varepsilon \frac{A_y y^2}{x V_y} = \quad (3)$$

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

در رابطه (۲)،  $V_F$  نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان،  $\rho$  دانسیته سیال،  $R_{DIF}$  ترم نفوذ پذیری آشفتگی،  $R_{SOR}$  منبع جرم، همینطور  $u$ ،  $v$  و  $w$  اجزای سرعت در جهت های  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  و در آخر  $A_x$ ،  $A_y$  و  $A_z$  مساحت کسری محیط به جریان در سه جهت می باشند. ضریب  $R$  وابسته به انتخاب سیستم مختصات است. معادلات مومنتم (معادلات ناویر-استوکس) برای اجزای سرعت سیال در سه جهت مختصات، با یک سری ترم های اضافی به شرح رابطه (۳) هستند (Fenton 1985). در این رابطه  $G_x$ ، شتاب بدنه و  $f_x$ ، شتاب ناشی از لزجت و  $b_x$ ، افت جریان در محیط های دارای خلل و فرج و ترم آخر سمت راست مربوط به تزریق جرم در سرعت صفر است.

### نتایج آزمایشگاهی مورد استفاده جهت صحت سنجی

در تحقیق حاضر با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی دو مقاله معتبر (Ataie and Aslani 2012) و Hosseini et al. (2016) به مدل سازی در نرم افزار FLOW-3D پرداخته شده است. مدل های آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش، شامل دو سازه تکیه گاه و پایه پل بر روی بستر صلب، مطابق شکل (۱-الف) و (۱-ب) می باشند. مدل سازی در حالت بستر صلب در واقع حالتی از حرکت جریان در طبیعت است که در آن ذرات بستر رودخانه امکان جابه جایی و تغییر مکان نداشته و لذا فرسایش و آبشستگی مصالح کف اتفاق نمی افتد. بر اساس مطالعات آزمایشگاهی برای شبیه سازی تکیه گاه و پایه های پل، به ترتیب مقادیر دبی مورد نظر ۴۶ و ۱۳۴ لیتر بر ثانیه با عمق جریان ۰/۱۵ و ۰/۳۲۵ متر اعمال گردیده است. آب،

<sup>1</sup> Vertical

میانگین ذرات بستر ( $d_{50} = 0.00071m$ ) برابر  $0/00071$  متر و سرعت جریان برابر  $0/33$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. ضریب یکنواختی ( $\sigma_g$ )  $1/20$ ، چگالی نسبی  $2/45$  و سرعت برشی بحرانی ( $U_{*cr}$ )  $0/19$  متر بر ثانیه اعمال شده است (Ataie (2012) and Aslani

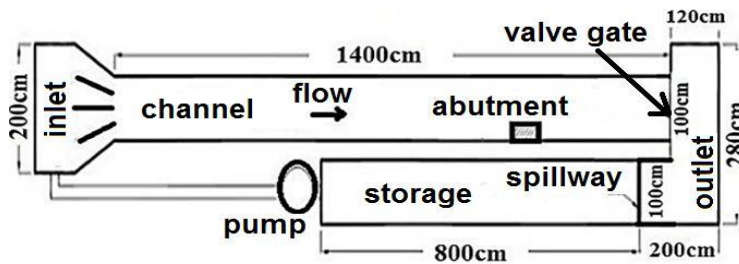
در پژوهش حاضر، دو مدل سازی اندرکنش سازه پایه و تکیه گاه پل طبق شکل (۱-د) در فلوم مستطیلی به طول، عرض و عمق به ترتیب  $10$ ،  $1$  و  $1$  متر انجام شده است. تکیه گاه مستطیلی در فاصله  $5/7$  متری از ابتدای کانال قرار گرفته که طول، عرض و ارتفاع آن به ترتیب  $0/3$ ،  $0/15$  و  $0/4$  متر می باشد. تک پایه<sup>۱</sup> (P.) و جفت پایه<sup>۲</sup> (2P.) در فاصله مذکور با قطر و ارتفاع به ترتیب  $0/1$  و  $0/4$  متر قرار دارند. طول فلوم در بالادست محل قرارگیری تکیه گاه به گونه ای انتخاب شده که جریان کاملاً توسعه یافته شود. در محدوده آزمایش، قطر میانگین ذرات بستر  $0/00091$  متر، دبی و عمق جریان به ترتیب  $46$  لیتر بر ثانیه و  $0/15$  متر در نظر گرفته شده اند.

باتوجه به عرض کانال و نیز عمق جریان، می توان سرعت متوسط را همانند کانال شامل تکیه گاه برابر با  $0/31$  متر بر ثانیه تخمین زد. در انتخاب قطر پایه های مورد استفاده در مدل، باید اثر جانبی با در نظر گرفتن تأثیر دیواره های فلوم بر روی آبشستگی موضعی اطراف پایه در نظر گرفته شود. رادکیوی و اتما حداکثر نسبت عرض پایه به عرض فلوم را  $0/16$  بیان کرده اند (Raudkivi and Ettema (1983). بنابراین قطر پایه ها در مدل ها،  $0/1$  متر انتخاب گردید. فاصله بین تک پایه و جفت پایه با تکیه گاه مستطیلی به صورت نزدیک<sup>۳</sup> (N.) طراحی شده و نسبت کسر  $\frac{x}{D} = \frac{17.5}{10} = 1.75$  (نسبت فاصله بین پایه و تکیه گاه به قطر پایه) بر مبنای تحقیقات قبلی منظور شده است (Oben (2007).

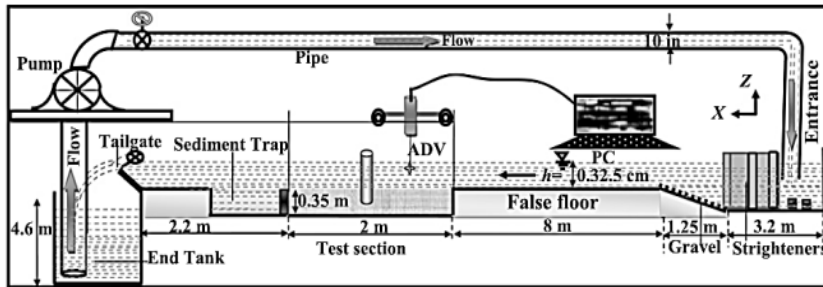
<sup>2</sup> One Pier

<sup>3</sup> Two Piers

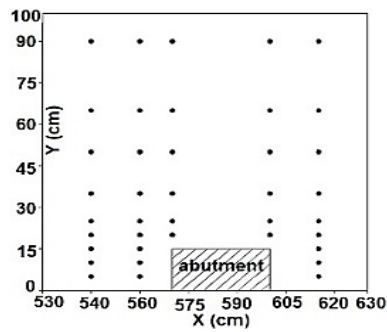
<sup>3</sup> Near



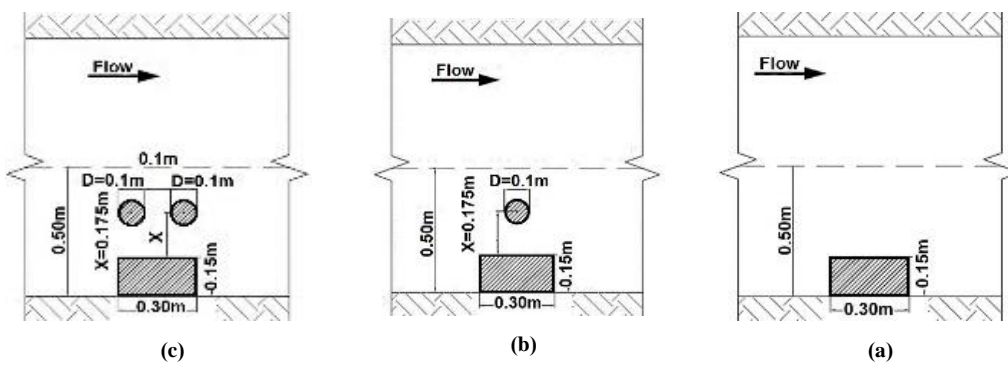
(الف)



(ب)



(ج)



(c)

(b)

(a)

(د)

شکل (۱): (الف) پلان فلوم آزمایش تکیه‌گاه و اجزای مختلف آن (Hosseini et al. 2016). (ب) پلان فلوم آزمایش پایه و اجزای مختلف آن (Ataie and Aslani 2012)، (ج) شکل شماتیک از نقاط برداشت‌شده اطراف تکیه‌گاه مستطیلی و (د) مدل شاهد (a) و دو مدل (b) V.N.P. و (c) V.N.2P.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E - N| \quad (۶)$$

مدل سازی شرایط مرزی و ایجاد شبکه

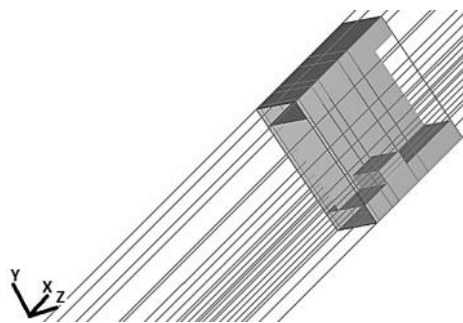
شرایط مرزی مدل تکیه‌گاه و مدل پایه در ورودی کانال جریان به ترتیب با دبی ۴۶ و ۱۳۴ لیتر بر ثانیه (Q) و عمق ۰/۱۵ و ۰/۳۲۵ متر، در کناره‌ها، مرز صلب (W) و در انتهای کانال به صورت ادامه‌دار (C) تعریف شده است. در مرز بالا شرط متقارن (S) و در کف شرط مرزی بسته (W) تعریف گردید. به منظور مش‌بندی مدل، در مرحله اول با لحاظ مشی اولیه و منطقی به بررسی هر سه مدل آشفتگی K-e, RNG و Les پرداخته شده است. در مرحله بعدی مدل آشفتگی ارجح با استفاده از سه نوع شبکه‌بندی تک‌بلوکه سه بعدی آزموده شد. جزئیات مدل‌سازی شرایط مرزی و شبکه بندی در شکل‌های (۲) و (۳) نمایش داده شده است.

شاخص های تعیین مقدار خطای مدل سازی

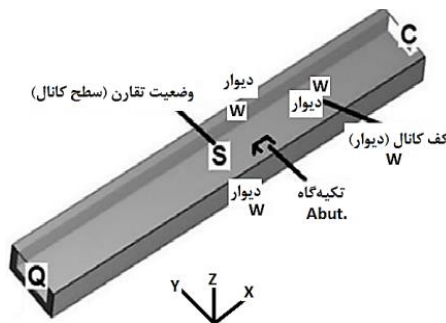
در این تحقیق جهت مدل‌سازی آشفتگی جریان، از مدل‌های K-e, RNG و Les استفاده شده است. برای ارزیابی عملکرد بهترین مدل آشفتگی از سه معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و میانگین قدرمطلق خطا (MAE) استفاده گردیده است. در روابط (۴)، (۵) و (۶)، E و N به ترتیب داده‌های آزمایشگاهی و عددی هستند. همچنین n تعداد کل داده‌ها می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E - N)^2}{n}} \quad (۴)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E - N)^2}{\sum_{i=1}^n E^2 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n N^2}{n} \right)} \quad (۵)$$

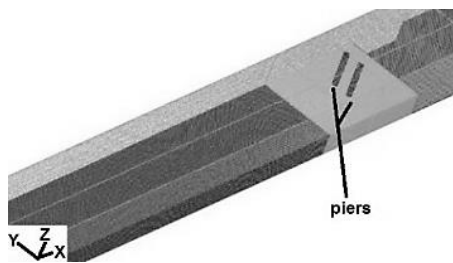


(ب)

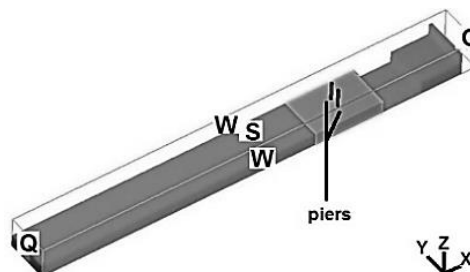


(الف)

شکل (۲): (الف) شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی در نرم‌افزار Flow-3D، (ب) محدوده هندسی شبکه‌بندی شده تکیه‌گاه



(ب)



(الف)

شکل (۳): (الف) شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی در نرم‌افزار Flow-3D، (ب) محدوده هندسی شبکه‌بندی شده جفت پایه

## نتایج و بحث

## صحت‌سنجی مدل عددی Flow-3D

برای استخراج مقادیر صحیح خروجی یک مدل عددی، رسیدن به حالت پایدار ضروری می‌باشد. در مدل عددی تکیه‌گاه و مدل عددی پایه پس از بررسی، به ترتیب زمان مناسب برای استخراج نتایج از مدل‌ها، برابر ۵۰۰ ثانیه و ۳۰۰ ثانیه مدنظر قرار گرفت. جریان بعد از ۵۰۰ ثانیه برای مدل تکیه‌گاه و پس از ۳۰۰ ثانیه برای مدل پایه با حالت پایداری بر روی کانال قرار می‌گیرد که این زمان صرفاً مربوط به هیدرولیک جریان است. لازم به ذکر است که مطابق با مدل آزمایشگاهی در مدل عددی نیز، جریان پیش از برخورد به مانع به حالت توسعه‌یافته رسیده بود. میانگین خطای نسبی مدل‌ها در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده در جداول (۱) و (۲) ارائه شده‌اند که نشان می‌دهند در هر دو RNG، مدل‌سازی تکیه‌گاه و پایه، مدل آشفتگی k- و Les مؤلفه سرعت را نسبت به مدل‌های آشفتگی RNG بهتر شبیه‌سازی نموده است؛ لذا مدل k-e مقایسه با دو مدل دیگر برای پیش‌بینی مؤلفه سرعت جریان در کانال مستطیلی مناسب‌تر است که از این (Karami et al. (2014) لحاظ با تحقیقات مشابه (رمضانی و باباگلی، ۱۳۹۵) مطابقت دارد. بنابراین در ادامه پژوهش حاضر، تحلیل شبیه‌سازی‌ها با استفاده از صورت پذیرفته RNG نتایج خروجی از مدل آشفتگی از دو RNG است. از آنجایی که صحت‌سنجی با مدل مدل دیگر مناسب‌تر بود، به بررسی تعداد مش بهینه با ۵۳۷۶۰۰ و ۵۳۲۹۸۰ سلول به ترتیب برای مدل تکیه‌گاه و مدل پایه، در آن پرداخته شده است. پس از انجام آنالیز حساسیت، شبکه‌بندی متوسط نتایج بهتری را نشان داد و مبنای مدل‌سازی قرار گرفت.

جدول (۱): مقایسه دقت مدل‌های آشفتگی در محاسبه سرعت در مرحله واسنجی مدل‌سازی تکیه‌گاه

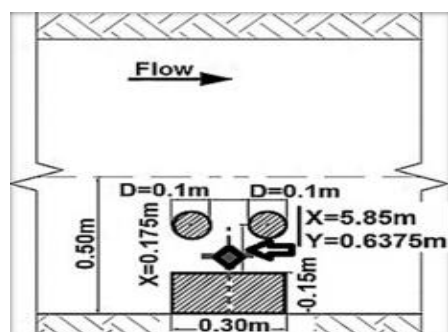
	R <sup>2</sup>	RMSE	MAE
RNG	۰/۹۶۳۴	۰/۰۲	۰/۰۳
Les	۰/۸۴۲	۰/۰۴	۰/۰۵
K-e	۰/۸۷۸	۰/۰۴	۰/۰۵

جدول (۲): مقایسه دقت مدل‌های آشفتگی در محاسبه سرعت در مرحله واسنجی مدل‌سازی پایه

	R <sup>2</sup>	RMSE	MAE
RNG	۰/۸۷۰۷	۰/۰۷۳۲	۰/۰۶۱۴
Les	۰/۸۳۵۵	۰/۰۸۰۹	۰/۰۷۰۴
K-e	۰/۴۷۴۸	۰/۰۵۷۱	۰/۰۴۶۸

### تحلیل اندرکنش تکیه‌گاه و پایه پل بر سرعت متوسط جریان

پروفیل‌های سرعت و تغییرات هیدرولیک جریان در دو آرایش V.N.P. و V.N.2P. شامل یک تکیه‌گاه مستطیلی در مجاورت یک پایه پل و بار دیگر در جوار دو پایه پل با فاصله ثابت نزدیک به هم، مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. مختصات نقطه ثابت مورد بررسی در پروفیل‌های سرعت طبق شکل (۴)، (۰/۴۳۷۵ و ۵/۸۵) می‌باشد.

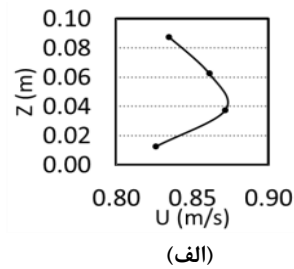
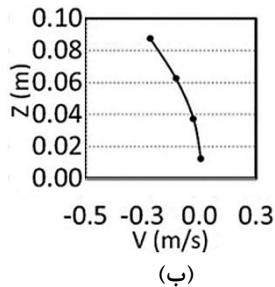
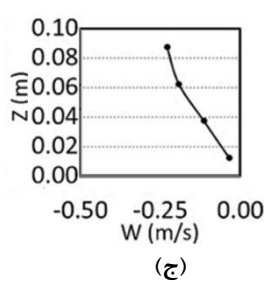


شکل (۴): نقطه ثابت مورد بررسی در تحلیل‌ها

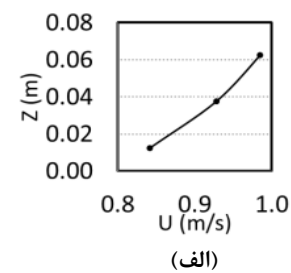
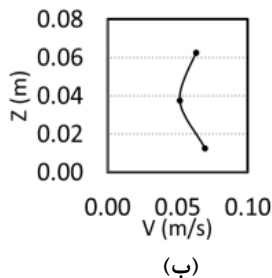
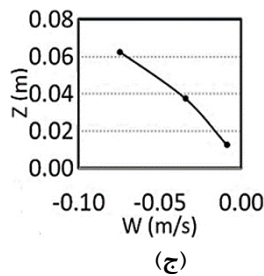


متری می‌باشد. همچنین کمینه مقدار سرعت در شکل (۶)، مربوط به مؤلفه عمقی و حدود ۰/۰۷ متر بر ثانیه و در عمق ۰/۰۶ متری اتفاق افتاده است. درصد کاهش مقدار سرعت نسبت به مقدار ماکزیمم در شکل (۵)، به ترتیب برای مؤلفه عرضی برابر با ۶۵/۵ و برای مؤلفه عمقی برابر با ۷۱/۳ درصد می‌باشد. در شکل (۶) نیز برای مؤلفه‌های مذکور به ترتیب برابر با ۹۵ و برابر ۹۳ درصد به دست آمده است.

شکل‌های (۵) و (۶)، گراف‌های سرعت در سه راستای طولی و عرضی و عمقی در هر دو آرایش را نشان می‌دهند. طبق شکل‌های (۵) و (۶)، بیشینه مقدار سرعت در هر دو آرایش، مربوط به مؤلفه طولی آن‌ها و به ترتیب نزدیک به ۰/۸۷ و ۱ متر بر ثانیه و در عمق ۰/۰۴ و ۰/۰۶ متری می‌باشد و در هر دو شکل در کف کانال مقداری تقریباً برابر با ۰/۸۲ متر بر ثانیه را دارد. کمینه مقدار سرعت در شکل (۵)، مربوط به مؤلفه عرضی و نزدیک به ۰/۳ متر بر ثانیه و در عمق ۰/۰۸



شکل (۵): منحنی راستای سرعت در آرایش V.N.P. (الف) مؤلفه طولی، (ب) مؤلفه عرضی و (ج) مؤلفه عمقی



شکل (۶): منحنی راستای سرعت در آرایش V.N.2P. (الف) مؤلفه طولی، (ب) مؤلفه عرضی و (ج) مؤلفه عمقی

این منطقه و حتی برگشت جریان در بعضی از لایه‌ها، گرداب‌های افقی شکل می‌گیرند که همان گرداب‌های برگشتی هستند. ملاحظه می‌شود که تشکیل حلقه‌های برگشتی جریان در منطقه بین سازه تکیه‌گاه و پایه ضعیف‌تر از سایر آرایش‌ها است و در واقع به نواحی پایین‌دست‌تر کشیده شده‌اند. آنچه از شکل‌های ۷-الف و ۷-ب نتیجه می‌شود این است که به‌علت فاصله کم بین سازه تکیه‌گاه و تک‌پایه، گرداب‌های نعل اسبی با تأثیرپذیری از سازه مجاور با فاصله از محدوده اندرکنش تشکیل شده‌اند و محدوده بین دو سازه دست‌خوش شدت تغییرات آشفته‌گی نشده است. پس

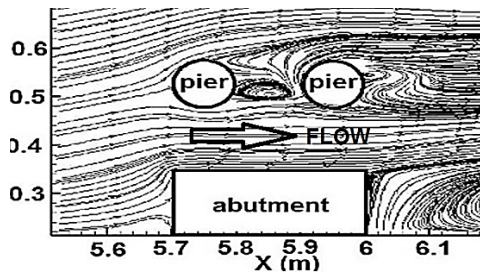
#### تأثیر اندرکنش تکیه‌گاه و پایه پل بر خطوط جریان

خطوط جریان مربوط به دو آرایش V.N.P. و V.N.2P. به ترتیب در شکل‌های ۷-الف و ۷-ب نشان داده شده‌اند. گرداب‌های برگشتی در پایین‌دست تکیه‌گاه مستطیلی مشهود است. همچنین برگشت جریان در حوالی پایین‌دست تک‌پایه مشاهده می‌شود. وجود گرداب‌های عمودی پیرامون تکیه‌گاه و نیز در حوالی پایه سبب شده است که در اطراف آن‌ها خطوط جریان فشرده‌تر شوند. خطوط جریان پس از عبور از مقابل تکیه‌گاه و نیز پایه به سمت پشت آن‌ها تمایل پیدا می‌کنند. در واقع به‌علت سرعت پایین جریان در

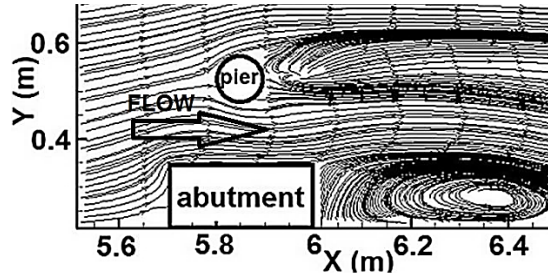
دست یافتند که چنانچه پایه در نزدیکی پنجه شیب سرریز یک تکیه‌گاه سرریزی باشد، عمق آبستگي را حتی ۱۰ تا ۲۰ درصد کاهش می‌دهد. به عبارتی در محدوده آبستگي، پایه نقش سنگ‌های ریپرپ را ایفا می‌کند.

فاکتور فاصله کم در اندرکنش این دو سازه در این آرایش و نهایتاً در کاهش شدت تلاطم و تنش مؤثر بوده است به گونه‌ای که نه تنها مخرب نبوده بلکه سازنده نیز می‌باشد.

پژوهش اوبن نیارکو و اتما که به آن اشاره شد این موضوع را تأیید می‌کند چراکه آنها نیز به این حقیقت



(ب)



(الف)

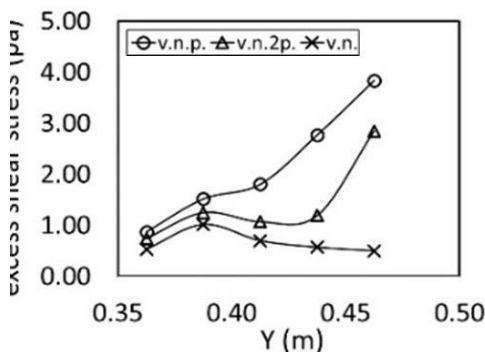
شکل (۷): خطوط جریان در آرایش‌های الف) V.N.P. و ب) V.N.2P.

شاهد را حدود ۱ پاسکال نشان می‌دهد، پس نسبت به مدل شاهد چهار برابر شده است. مدل V.N.P.، تکیه‌گاه مستطیلی در مجاورت تک‌پایه را بیان می‌کند که در این چیدمان، پارامتر تنش برشی بستر تغییرات شدیدی را در مقایسه با مدل شاهد نسبت به آرایش دیگر متحمل شده است. در هر دو شکل ۸-الف و ۸-ب با توجه به جهت جریان مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار هر دو پارامتر در سمت چپ پایه پل اتفاق افتاده است و نشان‌دهنده آن خواهد بود که احتمال وقوع فرسایش در سمت چپ پایه پل بیشتر از سایر نقاط می‌باشد.

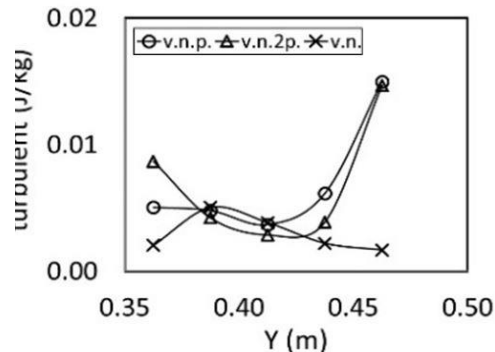
تحلیل گراف‌های انرژی آشفتگی جریان و تنش برشی بستر

مقایسه تغییرات انرژی آشفتگی جریان و تنش برشی بستر بین دو آرایش هندسی V.N.P. و V.N.2P. با حضور مدل شاهد در شکل ۸ به انجام رسیده است. در شکل ۸-الف، بیشینه مقدار انرژی آشفتگی - با اختلاف کم بین هر دو آرایش- مربوط به آرایش V.N.P. و حدود ۰/۰۱۵ ژول بر کیلوگرم می‌باشد. این مقدار، نسبت به بیشینه مقدار مدل شاهد که حدود ۰/۰۰۵ ژول بر کیلوگرم است، سه برابر شده است.

شکل ۸-ب بیشینه مقدار تنش برشی بستر را در مدل V.N.P. و حدود ۴ پاسکال و بیشینه مقدار مدل



(ب)



(الف)

شکل (۸): مقایسه گراف‌های V.N.P.، V.N.2P.، V. در حالت الف) انرژی آشفتگی و ب) تنش برشی بستر

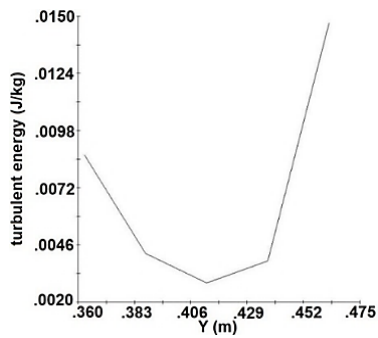
پیرامون پایه بالاتر و در امتداد ناحیه بین جفت پایه و برابر ۲/۲۶ پاسکال و کمینه را در محدوده بالادست و پایین دست تکیه گاه مستطیلی و پایین دست پایه پایین تر و نیز در ناحیه بین دو پایه و برابر ۰/۰۲ پاسکال نشان می دهد. شکل ۱۰-ب گویای پارامتر تنش برشی بستر در مدل V.N.2P. و به صورت نموداری و در راستای عرض کانال است. کمترین و بیشترین مقدار تنش برشی طبق این نمودار به ترتیب حدود ۰/۷ و ۳ پاسکال و در ۰/۳۶۰ و ۰/۴۷۵ متری از دیواره تحتانی کانال در پلان می باشد. اشکال ۱۰-ج و د نمایش تنش برشی بستر در مدل V.N.P. است که کمترین و بیشترین مقدار این پارامتر را پیرامون پایه و برابر ۳/۱۳ پاسکال و کمینه را در محدوده جداره بالادست و پایین دست تکیه گاه مستطیلی و برابر ۰/۰۲ پاسکال نشان می دهند. شکل ۱۰-د گویای پارامتر تنش برشی بستر به صورت نموداری و در راستای عرض کانال است. کمترین و بیشترین مقدار تنش برشی طبق این نمودار به ترتیب حدود ۰/۸ و ۳/۹ پاسکال و در ۰/۳۶۰ و ۰/۴۶۰ متری از دیواره تحتانی کانال در پلان می باشد.

### تحلیل کانتورهای انرژی آشفتگی جریان و تنش برشی بستر

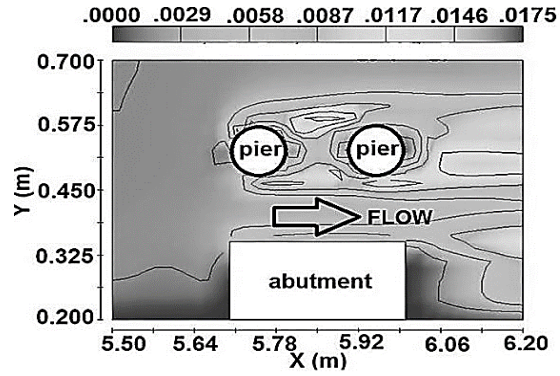
انرژی آشفتگی در محدوده بین پایه و تکیه گاه پل، در مدل V.N.2P. در اشکال ۹-الف و ب نشان داده شده است. کانتورهای شکل ۹-الف، بیشینه مقدار این پارامتر را در حوالی پایین دست جفت پایه و محدوده بینشان و برابر ۰/۰۱۱۷ ژول بر کیلوگرم و کمینه مقدار را تقریباً در بالادست و پایین دست تکیه گاه مستطیلی و پیرامون جداره آن و برابر صفر پاسکال-ثانیه نشان می دهد. شکل ۹-ب نیز گویای پارامتر انرژی آشفتگی به صورت نموداری و در راستای عرض کانال است. کمترین مقدار انرژی آشفتگی طبق این نمودار حدود ۰/۰۰۳۰ و در میانه عرض کانال و بیشترین مقدار آن برابر ۰/۰۱۵۰ ژول بر کیلوگرم و در حدود ۰/۴۶۰ متری از دیواره تحتانی کانال در پلان می باشد.

اشکال ۹-ج و د نیز، نمایش انرژی آشفتگی در آرایش V.N.P. است. کانتورهای شکل ۹-ج بیشینه مقدار این پارامتر را در حوالی پایین دست تک پایه و برابر ۰/۰۲۱۶ ژول بر کیلوگرم و کمینه مقدار را تقریباً در بالادست و پایین دست تکیه گاه مستطیلی و پیرامون جداره آن و برابر صفر پاسکال-ثانیه نشان می دهند. مطابق شکل ۹-د، کمترین و بیشترین مقدار انرژی آشفتگی در راستای عرض کانال، به ترتیب حدود ۰/۰۰۳۵ و ۰/۰۱۵۰ ژول بر کیلوگرم و در حدود ۰/۴۱۲ و ۰/۴۶۰ متری از دیواره تحتانی کانال در پلان می باشد.

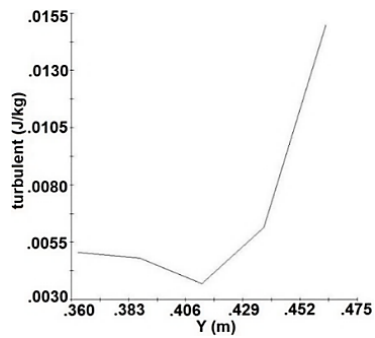
در ادامه، در شکل (۱۰) نمایش تنش برشی بستر در دو مدل V.N.P. و V.N.2P. ارائه شده است. کانتورهای شکل ۱۰-الف و ب مربوط به آرایش V.N.2P. می باشد. شکل ۱۰-الف بیشینه مقدار این پارامتر را



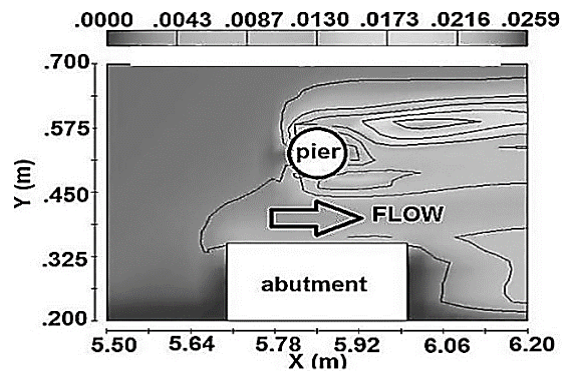
(ب)



(الف)



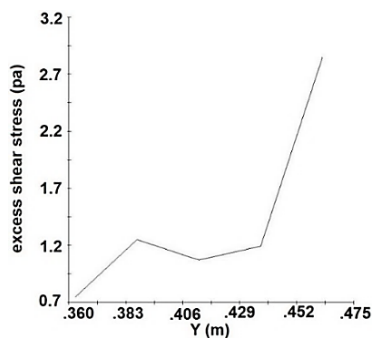
(د)



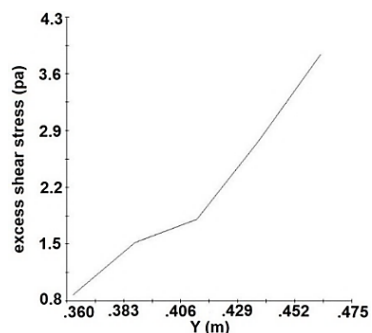
(ج)

شکل (۹): نمودار دوبعدی و یک بعدی تغییرات انرژی آشفتگی جریان در محدوده بین پایه و تکیه‌گاه پل در آرایش‌های

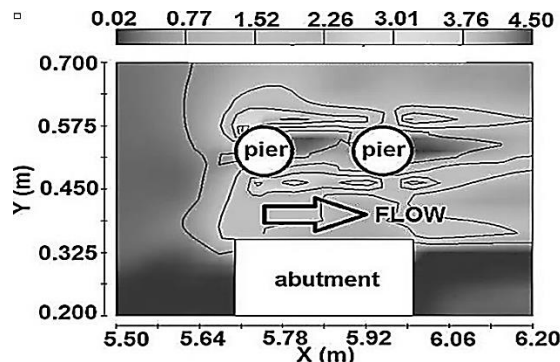
V.N.2P. (الف و ب) و V.N.P. (ج و د)



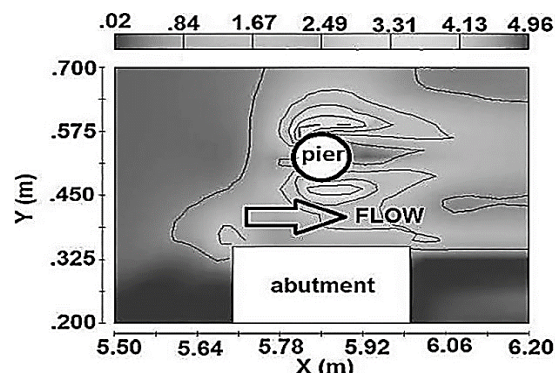
(ب)



(د)



(الف)



(ج)

شکل (۱۰): نمودار دوبعدی و یک بعدی تغییرات تنش برشی بستر در محدوده بین پایه و تکیه‌گاه پل در آرایش‌های

V.N.2P. (الف و ب) و V.N.P. (ج و د)

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق قابلیت شبیه‌سازی عددی جریان اطراف تکیه‌گاه مستطیلی به صورت سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D و مدل‌های آشفتگی Les, RNG و K-e بررسی شد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج حاصل نشان داد که مدل آشفتگی RNG به ترتیب برای تکیه‌گاه و پایه پل با داشتن ضریب تعیین  $(R2 = 0.9634)$  و  $(R2 = 0.8707)$ ، ریشه میانگین مربعات خطا  $(RMSE = 0.02)$  و  $(RMSE = 0.07)$  و میانگین قدر مطلق خطا  $(0.03)$  و  $(MAE = 0.06)$  نسبت به دو مدل آشفتگی K-e و Les از عملکرد بهتری برخوردار بود. نتایج حاصل از تحلیل اندرکنش تکیه‌گاه و پایه پل بر سرعت جریان، انرژی آشفتگی جریان، تنش برشی بستر و خطوط جریان به شرح ذیل است:

- ۱- نحوه جهت‌گیری و تراکم خطوط جریان در حوالی تکیه‌گاه و پایه پل و به‌خصوص در پایین‌دست تکیه‌گاه و پایه پل و به دنبال آن ایجاد گردابه‌های برگشتی، نشان از احتمال بالای فرسایش در این مناطق داشت. ضروری است هندسه و محل جای‌گیری این سازه‌ها مدنظر قرار گیرند.
- ۲- مقایسه مؤلفه‌های سه بعدی سرعت نشان داد که در بین دو آرایش V.N.2P. و V.N.P.، بیشینه مقدار سرعت مربوط به مؤلفه طولی و به ترتیب نزدیک به  $0.87$  و  $1$  متر بر ثانیه بود.
- ۳- مقایسه بین وضعیت تک پایه و جفت پایه نشان داد که جفت پایه تأثیر بیشتری در ایجاد تنش و تلاطم در الگوی جریان دارد.

ژول بر کیلوگرم در نزدیکی تکیه‌گاه مستطیلی به سمت مینیمم مقدارش در میانه مسیر پیش رفته و سپس سیر صعودی تا نزدیکی تک پایه را طی کرده که نهایتاً به ماکزیمم مقدارش در آن جا رسیده است.

۱۰- در آرایش V.N.2P. تنش برشی بستر از مقدار کمینه‌اش یعنی ۰/۰۲ پاسکال در حوالی تکیه‌گاه مستطیلی شروع به افزایش کرده و سپس سیر افزایشی خود را تا نزدیک جفت‌پایه طی کرده است. در این مدل، بیشترین آشفتگی و تنش برشی برابر با ۲/۲۶ پاسکال در حوالی جفت‌پایه اتفاق افتاده است.

۱۱- در آرایش V.N.P. تنش برشی بستر از کمترین مقدارش یعنی ۰/۰۲ پاسکال در نزدیکی تکیه‌گاه مستطیلی شروع به افزایش کرده و سیر افزایشی خود را تا ماکزیمم مقدارش یعنی ۳/۱۳ پاسکال در نزدیکی تک‌پایه طی کرده است. در این مدل بیشترین انرژی آشفتگی و تنش برشی بستر در حوالی تک‌پایه اتفاق افتاده است.

۴- فاصله نزدیک بین دو سازه تکیه‌گاه و پایه پل نقش سازنده‌ای در کاهش تشکیل گردابه‌های مخرب در محدوده اندرکنش دارد.

۵- پارامتر انرژی آشفتگی در هر دو مدل V.N.2P. و V.N.P.، وضعیت مشترکی داشتند؛ به این ترتیب که مقادیر کمینه در منطقه میانی اندرکنش (ناحیه بین دو سازه پایه و تکیه‌گاه) و بیشینه در نزدیکی محدوده پایه اتفاق افتاده است.

۶- مقدار انرژی آشفتگی جریان نسبت به مدل شاهد در مدل V.N.P.، ۳ برابر گردید.

۷- پارامتر تنش برشی بستر نسبت به مدل شاهد در مدل V.N.P. بیشینه مقدار و ۴ برابر شد.

۸- تحلیل اندرکنش در آرایش V.N.2P. بیان می‌دارد که تلاطم و آشفتگی جریان از مقدار ۰/۰۰۸۵ ژول بر کیلوگرم در نزدیکی تکیه‌گاه مستطیلی به سمت مینیمم مقدارش در میانه کانال پیش رفته و سپس سیر صعودی تا نزدیکی جفت‌پایه را طی کرده که نهایتاً به ماکزیمم مقدارش در آن جا رسیده است.

۹- تحلیل اندرکنش در آرایش V.N.P. بیان می‌دارد که تلاطم و آشفتگی جریان از مقدار ۰/۰۰۵۰

## منابع

- حسن‌زاده، ی.، ح. حکیم‌زاده و ش. عیاری. ۱۳۹۰. بررسی اثر اشکال مختلف پایه پل بر الگوی جریان اطراف آن با استفاده از نرم‌افزار Fluent. تحقیقات منابع آب ایران، دوره ۷، شماره ۴، صص ۹۵-۱۰۵.
- رضانی، ی.، ر. باباگلی سفیدکوهی. ۱۳۹۵. مقایسه مدل‌های آشفتگی در تخمین تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه پل در مقطع مرکب. نشریه دانش آب و خاک، شماره ۲۶، صص ۹۵-۱۰۹.
- Ataie-Ashtiani, B. and A. Aslani-Kordkandi. 2012. Flow Field around Side-by-Side Piers with and without a Scour Hole. Euro. J. Mech. B/Fluids, 36:152-166.
- Dey, S. and V. Raikar. 2007. Characteristics of Loose Rough Boundary Streams at Near-Threshold. J. Hydraul. Eng., 133(3):288-304.
- Fenton, J. D. 1985. A Fifth-Order Stokes Theory for Steady Waves. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 111(2):216-234.
- Hirt; C.W. and B. D. Nichols. 1981. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. J. Comp. Phys., 39(1):201-225.
- Hosseini, Kh., H. Karami, H. Hosseinjanzade and A. Ardeshir. 2016. Prediction of Time-Varying Maximum Scour Depth around Short Abutments Using Soft Computing Methodologies- a Comparative Study. KSCE J. Civ. Eng., 20(5):2070-2081.
- Karami, H., H. Basser, A. Ardeshir and Sh. Hosseini. 2014. Verification of Numerical Study of Scour around Spur Dikes Using Experimental Data. Water Environ. J., 28(1):124-134.

- Kim, H. S., M. Nabi, I. Kimura and Y. Shimizu. 2014. Numerical Investigation of Local Scour at Two Adjacent Cylinders. *Adv. Water Resour.* (70):131-147.
- Kandasamy J. K. and B. W. Melville. 2010. Maximum Local Scour Depth at Bridge Piers and Abutments. *J. Hyd. Res.*, 36(2):183-198.
- Oben- Nyarko, K. and R. Ettema. 2011. Pier and Abutment Scour Interaction. *J. Hydraul. Eng.*, 137(12):1598-1605.
- Oben- Nyarko, k. 2007. Pier and Abutment Scour Interaction in Compound Channels. PhD Thesis, University of Iowa.
- Raudkivi; A. and R. Ettema. 1983. Clear-Water Scour at Cylindrical Piers. *J. Hydraul. Eng.*, 109(3):338-350.

## Numerical study of the effect of interaction of bridge pier and rectangular abutment on flow characteristics

Somayeh Anjomrooz<sup>1</sup>, Hojat Karami<sup>2</sup>, Khosro Hoseini<sup>3</sup>, Saeed Farzin<sup>4</sup>

### Abstract

One of the important issues in bridge design is investigating the influence of vicinity of bridge abutment and pier on flow characteristics around it. In the present research, Flow-3D software was used for numerical modeling of a rectangular abutment in a rectangular channel in two situations (presence of one cylindrical pier and two cylindrical piers). For validation of the modeling results, three-dimensional components of flow velocity around the bridge abutment and piers were obtained from two sets of valid experimental data. After comparison of the experimental data and numerical results, it was found that RNG model for abutment and bridge piers (with coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.963 and 0.871, respectively) had better performance with respect to K- $\epsilon$  and LES turbulence models. Some of the flow characteristics such as turbulence energy and bed shear stress were investigated, too. The flow turbulence-energy of both models (rectangular abutment in the vicinity of single-pier and double-pier) was equal to and three times of the control model, respectively. Also, bed shear-stress of rectangular abutment in the vicinity of single cylindrical-pier was maximum and four times that of the control model. Investigation of the distance between rectangular abutment and bridge pier, considering the control model and other research results, indicated that closer distances are safer.

**Keywords:** Bridge Pier, Rectangular Abutment, Interaction, Flow Characteristics, Numerical Modeling.

<sup>1</sup>M.Sc. student, Civil Engineering Faculty, Semnan University, s.anjomrooz@semnan.ac.ir

<sup>2</sup> Assistant professor, Civil Engineering Faculty, Semnan University, \*hkarami@semnan.ac.ir

<sup>3</sup> Assistant professor, Civil Engineering Faculty, Semnan University, khoseini @ semnan.ac.ir

<sup>4</sup> Assistant professor, Civil Engineering Faculty, Semnan University, saeed.farzin@semnan.ac.ir