

تحلیل سه‌بعدی تأثیر تکیه‌گاه پل متصل به دیواره کانال بر پارامترهای هیدرولیکی جریان با استفاده از Flow-3D

حجت کرمی^۱، خسرو حسینی^۲، سعید فرزین^۳، محمدرضا نیک‌پور^۴، سمیه انجم‌روز^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۲۲

چکیده

در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان در یک کانال مستطیلی شامل یک تکیه‌گاه عمودی، با به‌کارگیری مدل Flow-3D، انجام گرفت. جهت صحت‌سنجی نتایج عددی، از مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت جریان پیرامون تکیه‌گاه حاصل از یک مطالعه آزمایشگاهی استفاده گردید. پس از مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و عددی، نشان داده شد که مدل RNG با داشتن ضریب تعیین ($R^2 = 0/963$)، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE = 0/02$) و میانگین قدر مطلق خطا ($MAE = 0/03$) نسبت به دو مدل آشفتگی K-ε و LES از عملکرد بهتری برخوردار بود و مش بهینه نیز بر اساس این مدل تعیین گردید. نتایج نشان داد که توجه به گردابه‌های بازگشتی و نوسانات سرعت در حوالی تکیه‌گاه، به‌خصوص در پایین‌دست آن، در طراحی مناسب هندسه و محل جای‌گیری تکیه‌گاه ضروری می‌باشد. ویسکوزیته و انرژی آشفتگی جریان در پایین‌دست تکیه‌گاه مستطیلی به بیشینه مقدار رسیده و تأثیر حضور مانع را مشخص‌تر نمود. بررسی‌ها همچنین نشان داد که در مقطع بعد از تکیه‌گاه، هم‌زمان با منفی شدن سرعت و کاهش بزرگی آن، ویسکوزیته سیر افزایشی داشت و تا مقدار ۰/۶۷ پاسکال ثانیه رسید. مقطع میانی تکیه‌گاه، کمترین ($0/00245$ ژول بر کیلوگرم) و مقطع بعد از آن، بیشترین انرژی آشفتگی (برابر با ۳/۵۹ ژول بر کیلوگرم) را داراست. تغییرات فشار حول تکیه‌گاه نیز حاکی از آن بود که فشار بیشینه (برابر با ۹۳۳ پاسکال) در مقطع قبل از تکیه‌گاه و فشار کمینه (برابر با ۸۶۰ پاسکال) در مقطع بعد از تکیه‌گاه اتفاق می‌افتد.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای هیدرولیکی جریان، تکیه‌گاه مستطیلی، مدل‌های آشفتگی، Flow-3D، RNG.

- ۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۰۹۱۲۴۸۰۳۳۵۰، hkarami@semnan.ac.ir
- ۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۰۹۱۲۱۴۰۴۵۲۳، khhoseini@semnan.ac.ir
- ۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۰۹۱۷۴۱۱۲۸۹۱، saeed.farzin@semnan.ac.ir (مسئول مکاتبه)
- ۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، ۰۹۱۳۲۲۲۰۴۸۵، m_nikpour@uma.ac.ir
- ۵- کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۰۹۱۲۸۰۹۶۸۱۱، s.anjomrooz@semnan.ac.ir

مقدمه

طراحی، محاسبه و احداث پایه و تکیه‌گاه پل‌ها از مهم‌ترین و حساس‌ترین مراحل یک پروژه پل‌سازی می‌باشند؛ به‌خصوص وقتی که این پل در محل عبور یک رودخانه واقع شده باشد. بر این اساس لازم است که سازه تکیه‌گاه پل همان‌گونه که در برابر شکست ژئوتکنیکی مقاوم می‌شود، در برابر فرسایش هیدرولیکی نیز محافظت گردد. در این زمان، 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. تاکنون مطالعات مختلفی در خصوص شناخت سازوکار آبشستگی اطراف سازه‌های هیدرولیکی و به‌خصوص پل‌ها انجام شده است. همچنین تحقیقاتی در مورد خصوصیات جریان و انواع مؤلفه‌های آن انجام گرفته و در برخی از مطالعات معیارهای لازم جهت طراحی این نوع از سازه‌های هیدرولیکی ارائه شده است.

پژوهشگرانی با استفاده از سرعت‌سنج صوتی (ADV) در آزمایشگاه، به اندازه‌گیری میدان جریان آشفته سه بعدی در یک استوانه نیم‌دایره‌ای عمودی متصل به دیواره یک کانال مستطیلی شکل پرداختند. در تحقیق آن‌ها، توزیع مؤلفه‌های زمان-میانگین سرعت، مؤلفه‌های شدت آشفتگی، انرژی جنبشی آشفتگی و تنش‌های رینولدز در صفحات شمالی ارائه شده‌اند. سپس آنها در فرازاب، با نشان دادن جریان آب با استفاده از بردارهایی در مقاطع عمودی و افقی، گردابی اصلی مرتبط با جریان پایین‌دست نزدیک استوانه، مشاهده نمودند. در ادامه با استفاده از تنش‌های رینولدز و گرادیان‌های سرعت، تنش‌های برشی بستر را محاسبه کردند (Barbhuiya and Dey, 2004). دیگر افراد تنش‌های آشفتگی در سطح زیرین اطراف یک تکیه‌گاه دیوار باله‌ای ۴۵ درجه را طبق شکل (۱) برآورد کردند. آن‌ها دریافتند که بیشینه عمق آبشستگی تکیه‌گاه با کاهش ارتفاع بستر در طی فرسایش، اتفاق می‌افتد. این عمق بیشینه به کمک معادله کانداسامی و ملویل که در

سال ۱۹۹۸ در مقاله خود ارائه دادند قابل برآورد بود. نتیجه بررسی آن‌ها نشان داد در ابتدا، به‌علت بیشینه تخریب لایه سنگ‌چین، ارتفاع توده‌های شنی یا ریگ-های روان قابل توجه است. با کاهش سرعت جریان از تنش برشی بستر کاسته شده و به تدریج شکل‌گیری توده ریگ‌های روان هم متوقف می‌شود. آزمایش آنها همچنین نشان داد که لایه سنگ‌چین تخریب شده، در مقابل سیلاب‌های بعدی با توده‌های شنی عظیم‌تر به‌طور چشم‌گیری آسیب‌پذیر خواهد بود (Dey et al., 2008).

دو محقق دیگر اندرکنش دو سازه تکیه‌گاه پل و پایه مجاور آن را در مرزی غیرچسبنده حول محور آبشستگی بررسی و عمق آبشستگی، محدوده آبشستگی و داده‌های عمق‌سنجی برای دو نوع تکیه‌گاه متداول دیوارباله‌ای^۲ و سرریزی (شیب‌دار)^۱ را تعیین کردند. نتایج ترکیبات پایه و تکیه‌گاه نشان داد که حضور پایه منجر به افزایشی اساسی در مقدار عمق آبشستگی تکیه‌گاه نمی‌گردد، حتی اگر چنانچه پایه در نزدیکی پنجه شیب سرریز یک تکیه‌گاه سرریزی باشد، عمق آبشستگی را کاهش نیز می‌دهد، به‌عبارتی در محدوده آبشستگی، پایه نقش سنگ‌های ریپرپ را ایفا می‌کند (Oben-Nyarko and Ettema, 2011). برخی پژوهشگران به کمک نرم‌افزار Fluent به شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز دایروی و مقایسه نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی پرداختند. آنها عملکرد برخی مدل‌های آشفتگی را به‌منظور پیش‌بینی شرایط هیدرولیکی روی این سرریز ارزیابی کردند. نهایتاً هم‌خوانی بهتر نتایج عددی مدل‌های RSM، RNG، K-ε، K-ε و SST K-ω با نتایج آزمایشگاهی حاصل گردید (Rahimzadeh et al., 2012). بعضی دیگر نیز یک بررسی آزمایشگاهی مربوط به طوقه‌های با اندازه‌های مختلف و جای‌گیری شده حول تکیه‌گاه‌های عمودی پل در اعماق مختلف روی بستر فرسایش‌پذیر یک کانال که شامل دو نوع ماسه تقریباً یکنواخت با $(d_{50})_1 = 1.48 \text{ mm}$ و $(d_{50})_2 = 0.90 \text{ mm}$ بود را به

1 Wing wall
2 Spill through

سال هفتم • شماره بیست و هفتم • بهار ۱۳۹۶

نتیجه ANFIS از دیگری صریح تر می باشد (Hosseini et al., 2016).

دیگر محققان با بررسی صحت شبیه سازی تعداد نه کانال مرکب نامتقارن در قیاس با شرایط آزمایشگاهی به نتایجی در تغییرات پارامترهای هیدرولیکی جریان رسیدند. نتایجی اعم از اندرکنش سرعت و گردابه، هم چنین افزایش اعداد فرود و وبر برابر ۲۰ و ۱۴۵٪ به علت افزایش سرعت در بستر سیلابی و دیگر اینکه با تغییر عرض و عمق بستر سیلابی، تراز سطح آب به ترتیب ۴ تا ۲۰٪ و ۵ تا ۳۴٪ تغییر می کند (Sajjadi et al., 2016). دیگر پژوهشگران با شبیه سازی سه بعدی حفره آبشستگی اطراف تکیه گاه پل با دیواره قائم با نرم افزار Flow-3D، به بررسی بهترین مدل آشفتگی در تعیین مقدار عمق میانگین جریان و مقدار بیشینه عمق آبشستگی و محل وقوع آن پرداختند. نتایج کار آنها حاکی از آن بود که مدل مذکور، موارد فوق را با دقت خوبی در قیاس با نتایج داده های آزمایشگاهی پیش بینی می کند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۳). بعضی دیگر هم در مطالعه الگوی جریان و آبشستگی پیرامون تکیه گاه پل با مقطع مستطیلی نشان دادند که با کاهش نسبت عرض به طول تکیه گاه، عمق آبشستگی و وسعت چاله آبشستگی افزایش می یابد (خزیمه نژاد و همکاران، ۱۳۹۴). دو محقق دیگر، مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی برای پارامتر تنش برشی بستر حول تکیه گاه پل را با نرم افزار Flow-3D انجام دادند. نتایج آزمایشگاهی آنها نشان داد بیشترین تنش برشی بستر در دماغه بالادست تکیه گاه اتفاق می افتد. بهترین مدل عددی را نیز RNG برآورد کردند. بیشینه مقدار تنش برشی بستر در نتایج آزمایشگاهی و عددی آنها به ترتیب ۳/۸۴ و ۴/۶ نیوتن بر مترمربع به دست آمد (رضائی و باباگلی سفیدکوهی، ۱۳۹۵).

در زمینه آبشستگی اطراف پل ها تمرکز پژوهش ها بیشتر بر روی پایه بوده و پژوهش های انجام شده در خصوص تکیه گاه کمتر بوده است. بررسی منابع نشان می دهد که شکل تکیه گاه بر میزان آبشستگی پیرامون آن تأثیر به سزایی دارد و در بین اشکال مختلف

منظور نشان دادن تأثیر طوق بر عمق آبشستگی اطراف تکیه گاه ها انجام دادند. بررسی های آزمایشگاهی و تحلیل های انجام گرفته در پژوهش آنها نشان داد که آرایش طوقه تکیه گاه می تواند راه حل مناسبی به منظور حفظ و نگهداری پوشش سنگ چین باشد که در عمل برای مقابله با مشکلات آبشستگی در تکیه گاه های پل به طور گسترده ای استفاده می شود (Kumcu et al., 2014).

همچنین افرادی به بررسی پدیده آبشستگی حول تعدادی آبشکن غیرمستغرق ناتراوا، با بهره گیری از هر دو روش عددی و آزمایشگاهی پرداختند. روش عددی آنها با استفاده از نرم افزار SSIIM 2.0 برمبنای روش جزء حجم سیال به منظور محاسبه انتقال رسوب حول آبشکن ها بود. بررسی های آنها نشان داد که بهترین مدل آشفتگی برای پژوهششان مدل K-ε-RNG می باشد. نهایتاً دامنه متنوعی از شبکه بندی ها و معادلات انتقال رسوب برای شبیه سازی آبشستگی حول آبشکن ها را به کار بردند تا به بهترین نسبت $\frac{U}{U_{cr}}$ رسیدند (Karami et al., 2014) و نیز برخی دیگر مطالعه عددی و آزمایشگاهی ای پیرامون پدیده آبشستگی حول مقطع عرضی تکیه گاه مستطیلی ناتراوا در حالت عمود بر محورهای جریان انجام دادند. آنها در این پژوهش از نرم افزار SSIIM 2.0 برپایه روش حجم محدود استفاده کردند و نهایتاً با انتخاب بهترین مش بندی و بهترین مدل آشفتگی که به K-ε-RNG منتج گردید و نیز صحت سنجی به این نتیجه رسیدند که نرم افزار SSIIM 2.0 قابلیت خوبی در مدل سازی آبشستگی حول تکیه گاه مستطیلی دارد (Basser et al., 2015).

محققانی به بررسی بیشینه عمق آبشستگی حول تکیه گاه قائم، دیوار باله ای و نیم دایروی به صورت آزمایشگاهی با ۱۴۰۰ داده پرداختند. نتایج نشان داد که ۹۰-۷۰٪ از آبشستگی در همان زمان ۲۰٪ اولیه اتفاق می افتد. 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

$$\frac{\partial}{\partial x_i} u_i A_i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V} (u_i A_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + G_i + f_i - k u_i \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲):

$$G_i = \rho V_f f_i = \omega S_{ii} - \left[\frac{\partial}{\partial x_i} (A_j S_{ij}) \right] \quad (3)$$

$$S_{ii} = -2\mu_{tot} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] \quad (4)$$

$$S_{ij} = -\mu_{tot} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (5)$$

در روابط (۱) تا (۵) u_i سرعت متوسط، P فشار، A_i کسر سطح آزاد به جریان در جهت i ، V_f کسر حجم باز به جریان، G_i بیان گر شتاب‌های جرم، f_i شتاب‌های ویسکوز، K ترم نیروی پسای بین ذره‌ای رسوب، S_{ij} تانسور نرخ کرنش، ωS_{ii} تنش برشی جدار، ρ چگالی آب و μ_{tot} گرانیوی دینامیکی کل است، که اثرات آشفتگی را لحاظ می‌کند ($\mu_{tot} = \mu + \mu_T$) (قاسم‌زاده، ۱۳۹۲).

نرم‌افزار Flow-3D از روش حجم سیال (VOF) برای بررسی سطح مشترک سیال-سیال و سیال-هوا استفاده می‌کند. روش VOF حجم سیال در هر سلول مستطیلی را ثبت می‌کند. این حجم با احجام سلول‌های مجاور مقایسه می‌شود تا شیب، موقعیت و انحنای سیال درون سلول مشخص شود (Smith, 2004). در روش مذکور تابع $F(x, y, t)$ تعریف می‌شود. تابع F به شکل زیر بوده و مقدار آن بین صفر تا ۱ متغیر می‌باشد.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

تکیه‌گاه، تکیه‌گاه مستطیلی بیش‌ترین میزان آبشستگی را متحمل می‌شود. در پژوهش حاضر شبیه‌سازی پارامتر سرعت جریان، حول تکیه‌گاهی مستطیلی واقع در میانه کانالی مستطیلی، به‌طور دقیق و بسط داده‌شده به‌همراه تفکیک مدل‌های آشفتگی متفاوت از جمله LES، RNG و K- ϵ به صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D انجام شد و هر یک به‌طور مجزا مورد تفسیر و نتیجه‌گیری قرار گرفتند. شبیه‌سازی سایر مؤلفه‌های هیدرولیکی جریان شامل ویسکوزیته آشفتگی، انرژی جنبشی آشفتگی و فشار به‌همراه الگوی تغییرات آن‌ها انجام شده است. علاوه بر اینکه اندازه‌گیری پارامترهای مذکور در آزمایشگاه میسر نمی‌باشد، در شبیه‌سازی‌های عددی نیز محاسبه و تحلیل نشده‌اند. همچنین نمودارهای مرتبط با پارامترهای هیدرولیکی جریان، هرکدام به تفکیک مقاطع طولی کانال، تحلیل شده‌اند.

مواد و روش‌ها

مدل عددی (معادلات حاکم)

Flow-3D، یکی از کامل‌ترین، قوی‌ترین و کاربردی‌ترین نرم‌افزارهایی است که با حل عددی معادله جریان سیال (در یک شکل خاص) به روش CFD روی یک ناحیه مورد نظر، با اعمال شرایط مرزی مشخص، رفتار سیال را پیش‌بینی می‌کند. این مدل توانایی شبیه‌سازی و تشخیص سیال-مرز و تحلیل سطح مشترک سیال-سیال و سیال-هوا را با مختصات نامحدود مستطیلی و یا استوانه‌ای دارد (قاسم‌زاده، ۱۳۹۲). این مدل برای طیف وسیعی از مسائل هیدرولیکی و مهندسی سواحل به‌کار گرفته شده است. مدل مذکور، به‌طور هم‌زمان معادلات سه‌بعدی ناویر-استوکس و معادله پیوستگی را حل می‌کند. معادله پیوستگی (رابطه ۱) و رابطه ناویر-استوکس (رابطه ۲) برای سیالات تراکم‌ناپذیر به این صورت است:

نرخ اتلاف آن است. این مدل از روابطی مانند روابط موجود در مدل K-ε استفاده می‌کند. تفاوت بین دو مدل RNG و K-ε در آن است که ضرایب ثابت موجود در مدل K-ε که به روش تجربی محاسبه می‌شوند، در مدل RNG به صورت صریح استخراج می‌گردند. مدل RNG کاربرد گسترده‌تری نسبت به مدل K-ε دارد. در عمل شهرت مدل RNG به تولید نتایج دقیق در جریان‌های با شدت کم آشفتگی و جریان‌های با نواحی برشی قوی می‌باشد. ایده اصلی مدل LES آن است که تمام ساختارهای تلاطم که قابل محاسبه با استفاده از شبکه محاسباتی هستند، به طور مستقیم محاسبه شوند و تنها ساختارهایی ریز که قابل محاسبه نیستند، تقریب زده شوند. این مدل سه بعدی و وابسته به زمان اطلاعات بیشتری نسبت به روش RNG تولید می‌کند و نتایجی که حاصل می‌شود دارای جزئیات بیشتری نسبت به مدل‌های بر پایه متوسط‌گیری رینولدز است. برای ارزیابی عملکرد بهترین مدل انتقال آشفتگی از سه معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2) و میانگین قدرمطلق خطا (MAE) استفاده گردیده که هرچه مقدار عددی RMSE و MAE به عدد صفر و مقدار عددی R^2 به عدد یک نزدیک‌تر باشند، جواب بهتری برای مدل حاصل شده است (قاسم‌زاده، ۱۳۹۲).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E - N)^2}{n}} \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E - N)^2}{\sum_{i=1}^n E^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n N^2}{n} \right)} \right] \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E - N| \quad (9)$$

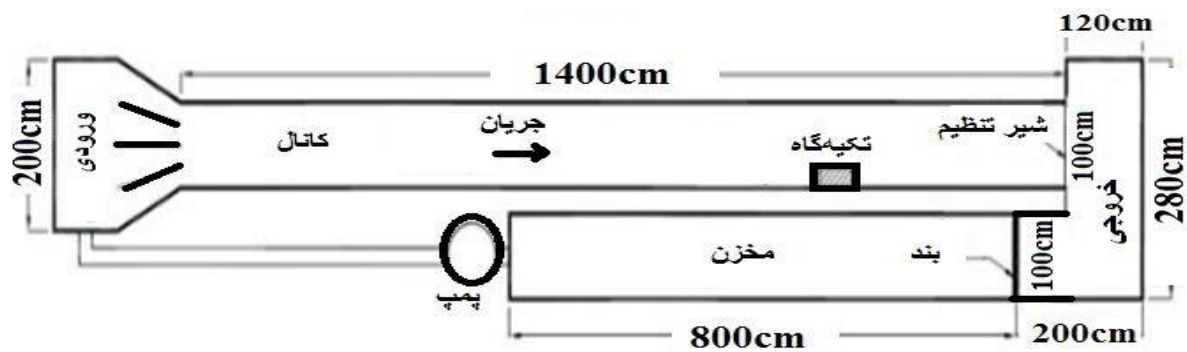
برای حل معادله (۶) در سلولی که پر از آب است، مقدار تابع F برابر یک می‌باشد. در سلول خالی (پر از هوا) مقدار تابع برابر صفر است و در سلول‌هایی که سطح آب وجود دارد این مقدار بین صفر و یک می‌باشد.

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این مقاله، مطابق شکل (۲) می‌باشد (Hosseini et al., 2016). این مدل، کانالی به طول ۱۰ متر، عرض ۱ متر، ارتفاع ۰/۸ متر با ضریب زبری کف ۰/۰۰۰۹۱ متر می‌باشد. در فاصله ۵/۷ متری از ابتدای کانال، یک تکیه‌گاه مستطیلی قرار گرفته که طول، عرض و ارتفاع آن به ترتیب ۰/۳، ۰/۱۵ و ۰/۴ متر در نظر گرفته شده است. آب، سیال جریان یافته در کانال است که تمامی خواص فیزیکی آن در دمای ۲۹۳ کلونین می‌باشد. شکل (۳) نقاطی از جریان را نشان می‌دهد که با ارتفاع ثابت ۰/۰۵ متر و طول و عرض‌های مشخص به منظور صحت‌سنجی مدل برداشت شده‌اند. برای اندازه‌گیری سرعت جریان از ADV استفاده شد.

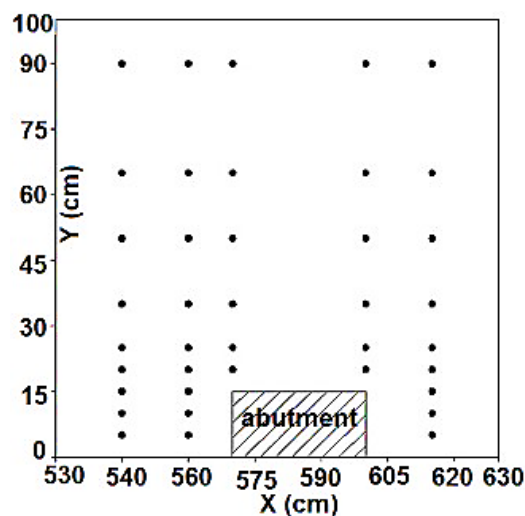
مدل‌های آشفتگی و معیارهای ارزیابی دقت مدل

هدف اصلی هر مدل آشفتگی ایجاد سازوکاری برای تعیین اثر تغییرات آشفتگی بر روی کمیت‌های متوسط جریان است. در این تحقیق از مدل‌های RNG، K-ε و LES استفاده شده است. در مدل K-ε، مقیاس طول بدون نیاز به روابط تجربی برآورد می‌شود. برای تخمین مقیاس طول و مقیاس سرعت از کمیت آشفتگی که از حل معادلات دیفرانسیلی بدست می‌آیند استفاده می‌شود. همچنین کمیت اتلاف آشفتگی یا $\epsilon \left(\frac{m^2}{s^3} \right)$ نیز که معرف مقیاس طول است، تعریف شده و مشابه K با استفاده از معادله ناویراستوکس برآورد می‌شود. در واقع، مقیاس طول بیانگر اندازه گردابه‌های بزرگ دارای انرژی جنبشی است که باعث انتقال آشفتگی در توده سیال می‌شود. مدل RNG نیز دربرگیرنده روش‌های آماری برای دست‌یابی به معادلات متوسط‌گیری شده برای کمیت‌های آشفتگی نظیر انرژی جنبشی و



شکل (۲): شماتیک مدل آزمایشگاهی کانال و تکیه‌گاه

مستطیلی داخل آن (Hosseini et al., 2016)



شکل (۳): شماتیک نقاط برداشت شده اطراف تکیه‌گاه

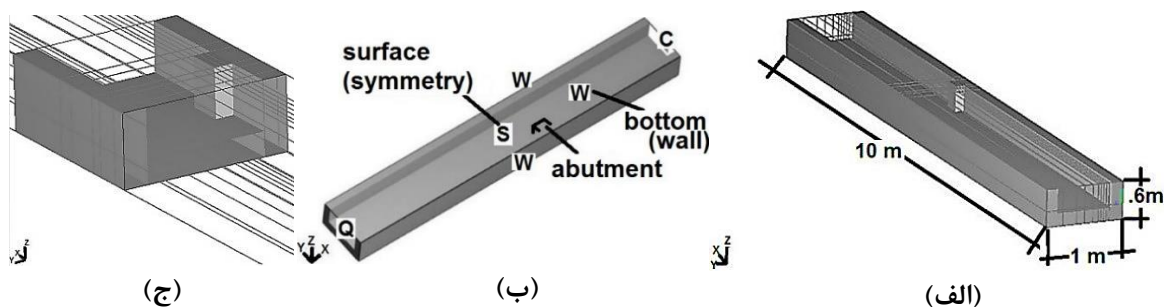
مستطیلی

سه‌بعدی ریز، متوسط و درشت به ترتیب با ابعاد ۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ متر آزموده شد. جزئیات مش بهینه در شکل (۴) نمایش داده شده است. شرایط مرزی مدل در ورودی کانال جریان با دبی ۴۶ لیتر بر ثانیه و عمق ۱۵ سانتی‌متر (Q)، در کنارها، مرز صلب (W) و در انتهای کانال به صورت ادامه‌دار (C)، تعریف شده است. در مرز بالا شرایط متقارن (S) و در کف شرط مرزی بسته (W) تعریف گردید.

در روابط (۷)، (۸) و (۹)، E و N به ترتیب داده‌های آزمایشگاهی و عددی هستند. همچنین n تعداد کل داده‌ها می‌باشد.

تعریف محدوده هندسی، ایجاد شبکه و تعیین شرایط مرزی

به منظور مش‌بندی مدل، در وهله اول با لحاظ مشی اولیه و منطقی به بررسی هر سه مدل آشفتگی RNG، K-ε و LES پرداخته شده است. در وهله بعدی مدل ارجح با استفاده از سه نوع شبکه‌بندی تک بلوکه



شکل (۴): (الف) محدوده هندسی شبکه‌بندی شده کانال مستطیلی به همراه تکیه‌گاه مستطیلی داخل آن،

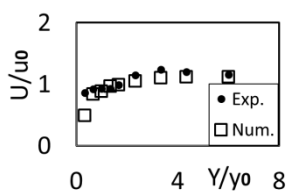
(ب) شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی در نرم‌افزار Flow-3D (ج) محدوده هندسی شبکه‌بندی شده تکیه‌گاه

نتایج و بحث

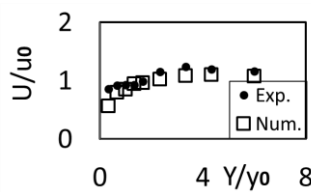
واسنجی مدل عددی

K-ε بهتر شبیه‌سازی نموده است. همچنین متوسط سرعت به دست آمده از مدل RNG نسبت به مدل‌های LES و K-ε مطابقت بیشتری با نتایج تجربی دارد، چراکه طبق شکل (۸) ضریب تعیین مدل معادل ۰/۹۶۳۴ و مقادیر RMSE و MAE به ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۰۳ برآورد شده است. بنابراین در ادامه پژوهش حاضر، تحلیل شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نتایج خروجی از مدل آشفتگی RNG صورت پذیرفته است. از آنجایی که کالیبره با مدل RNG از دو مدل دیگر بهتر بود پس به بررسی تعداد مش بهینه در آن پرداخته شده است. پس از انجام آنالیز حساسیت، شبکه‌بندی متوسط طبق جدول (۲) نتایج بهتری را نشان داد و مبنای مدل‌سازی قرار گرفت. جزئیات این مراحل در شکل‌های بی‌بعد (۹) تا (۱۱) نمایش داده شده است.

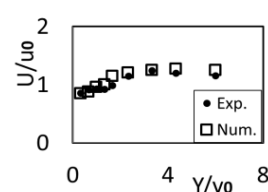
نرم‌افزار Flow-3D حل عددی معادلات را با استفاده از روش حجم محدود انجام می‌دهد. شبکه‌بندی میدان محاسباتی داخل خود نرم‌افزار Flow-3D انجام شد. مدل‌سازی برای مدت زمان ۵۰۰ ثانیه انجام شده و دامنه جریان به حالت پایدار رسید. لازم به ذکر است که مطابق با مدل آزمایشگاهی در مدل عددی نیز، پیش از برخورد جریان به مانع، به حالت توسعه یافته رسیده بود. در شکل‌های (۵) تا (۷) پروفیل‌های سرعت حاصل از هر سه مدل آشفتگی در فواصل مختلف از تکیه‌گاه نمایش داده شده است. میانگین خطای نسبی مدل‌ها در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده در جدول (۱) ارائه شده‌اند. جدول (۱) نشان می‌دهد که مدل آشفتگی RNG، مؤلفه سرعت را نسبت به مدل‌های آشفتگی LES و



(ج)



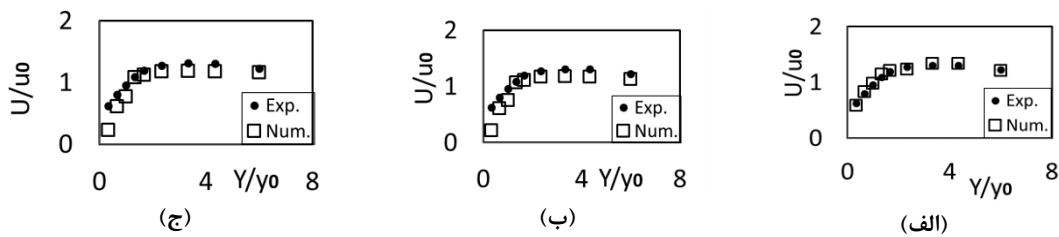
(ب)



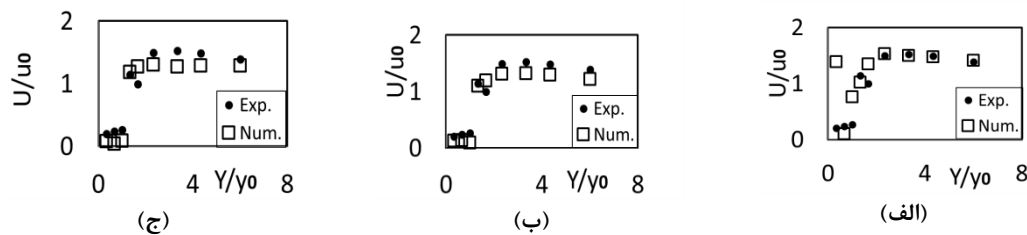
(الف)

شکل (۵): مقایسه سرعت به دست آمده از: (الف) RNG، (ب) K-ε و (ج) LES با داده‌های آزمایشگاهی در فاصله ۵۴۰

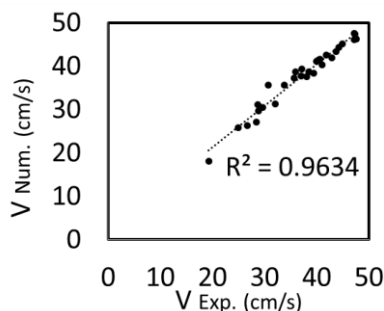
سانتی‌متری از ابتدای کانال



شکل (۶): مقایسه سرعت به دست آمده از: (الف) RNG، (ب) K-ε و (ج) LES با داده‌های آزمایشگاهی در فاصله ۵۶۰ سانتی متری از ابتدای کانال



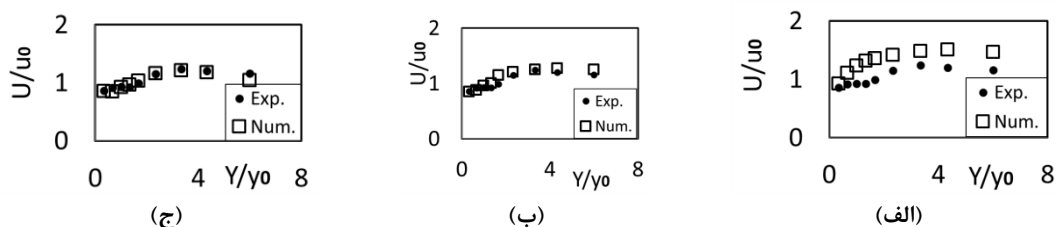
شکل (۷): مقایسه سرعت به دست آمده از: (الف) RNG، (ب) K-ε و (ج) LES با داده‌های آزمایشگاهی در فاصله ۶۱۵ سانتی متری از ابتدای کانال



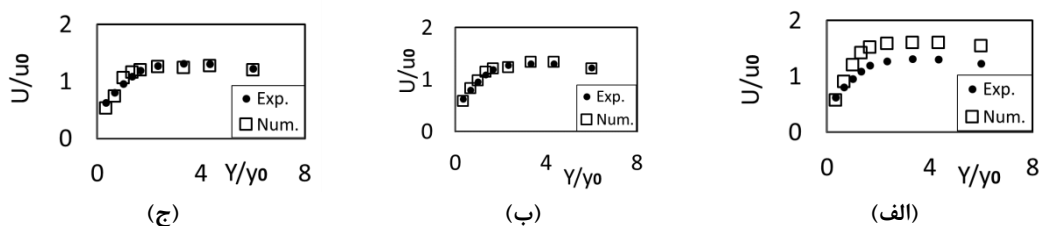
جدول (۱): مقایسه دقت مدل‌های آشفتگی در محاسبه سرعت در مرحله واسنجی

| | R^2 | RMSE | MAE |
|-----|--------|------|------|
| RNG | ۰/۹۶۳۴ | ۰/۰۲ | ۰/۰۳ |
| LES | ۰/۸۴۲ | ۰/۰۴ | ۰/۰۵ |
| K-ε | ۰/۸۷۸ | ۰/۰۴ | ۰/۰۵ |

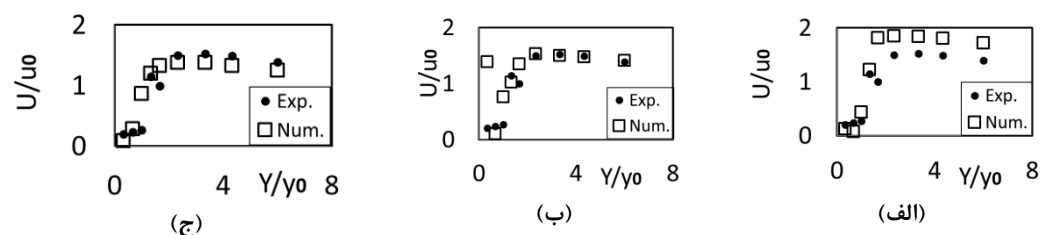
شکل (۸): مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی سرعت با بهترین مدل انتقال آشفتگی (RNG)



شکل (۹): مقایسه سرعت به دست آمده در مدل RNG از: (الف) مش ریز، (ب) مش متوسط و (ج) مش درشت با داده‌های آزمایشگاهی در فاصله ۵۴۰ سانتی متری از ابتدای کانال



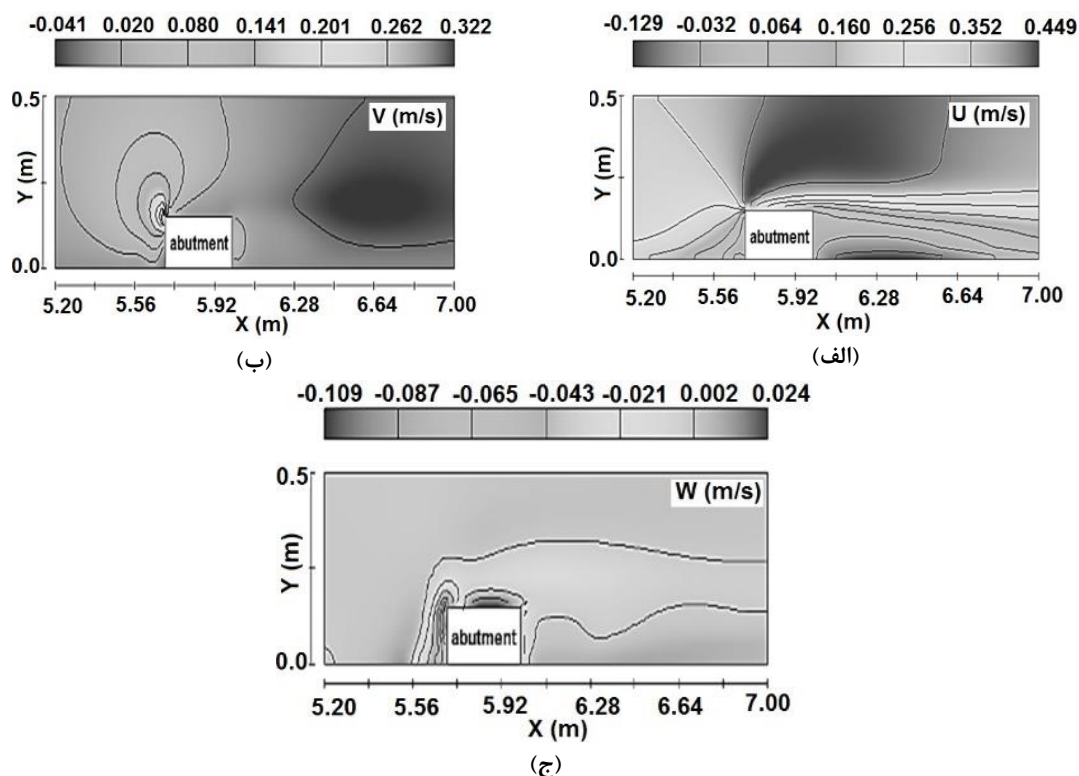
شکل (۱۰): مقایسه سرعت به دست آمده در مدل RNG از: (الف) مش ریز، (ب) مش متوسط و (ج) مش درشت با داده‌های آزمایشگاهی در فاصله ۵۶۰ سانتی متری از ابتدای کانال



شکل (۱۱): مقایسه سرعت به دست آمده در مدل RNG از: (الف) مش ریز، (ب) مش متوسط و (ج) مش درشت با داده‌های آزمایشگاهی در فاصله ۶۱۵ سانتی متری از ابتدای کانال

جدول (۲): مقایسه دقت مش‌ها در محاسبه سرعت در مرحله واسنجی

| MAE | RMSE | R ² | |
|------|------|----------------|----------|
| ۰/۱۰ | ۰/۰۹ | ۰/۹۲۶۸ | مش ریز |
| ۰/۰۳ | ۰/۰۲ | ۰/۹۶۳۴ | مش متوسط |
| ۰/۰۴ | ۰/۰۳ | ۰/۸۳۸۲ | مش درشت |



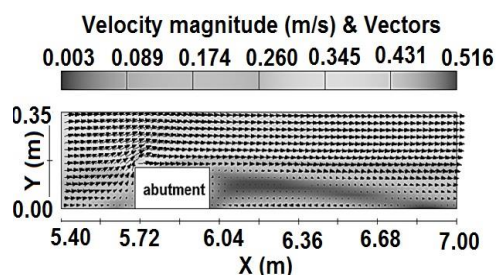
شکل (۱۲): شبیه‌سازی مؤلفه‌های سرعت جریان در RNG: (الف) u، (ب) v، (ج) w

تکیه‌گاه نزدیک‌تر می‌شود، این عدد به مقدار منفی $۰/۰۶۵$ متر بر ثانیه نزدیک تر می‌گردد. در ناحیه بالادست تکیه‌گاه روند منفی شدن سرعت و مقداری تقریباً بین منفی $۰/۰۲۱$ تا $۰/۰۸۷$ متر بر ثانیه مشاهده می‌شود. دیواره جلویی تکیه‌گاه در معرض حداکثر مقدار سرعت برابر با $۰/۰۲۳$ متر بر ثانیه قرار گرفته است.

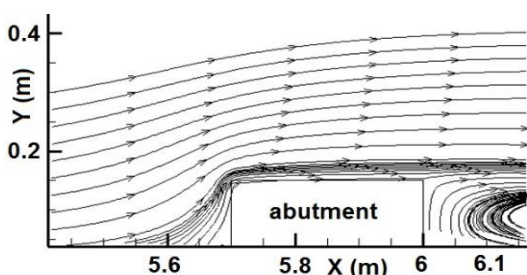
در ادامه، در شکل (۱۳) بردارهای سرعت به همراه کانتور بزرگی مقدار سرعت نشان داده شده است. این بردارها نشان‌دهنده مقدار میانگین سرعت هستند. در اطراف تکیه‌گاه، به تدریج مقدار سرعت دچار نوسان شده است. به دلیل وجود تکیه‌گاه تغییراتی در روند حرکت جریان پیش می‌آید. به‌طوریکه حضور آن به صورت عمودی در بستر کانال موجب فشرده‌گی جریان در رودخانه و تلاطم جریان آب در اطراف تکیه‌گاه و جریانات گردابی می‌شود. ناحیه گوشه بیرونی بالادست تکیه‌گاه افزایش بزرگی سرعت و نزدیک شدن آن به مقدار $۰/۵۱۶$ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. سیستم اصلی گردابی از برخورد جریان به جلوی تکیه‌گاه و انحراف آن به طرف پایین ایجاد می‌شود. جریان چرخشی در پایین‌دست تکیه‌گاه به طرفین آن امتداد یافته و شکلی به خود گرفته که در پلان شبیه نعل اسب است، از این رو به آن گرداب نعل اسبی گفته می‌شود (زرانی، ۱۳۸۱). در ناحیه پایین‌دست تکیه‌گاه به طرف انتها، سرعت روند کاهشی دارد و کمینه مقداری برابر با $۰/۰۰۳$ متر بر ثانیه و نیز گردابه‌های برگشتی در نزدیکی دیواره تحتانی کانال به وقوع می‌پیوندد. شکل (۱۴) الگوی جریان در اطراف تکیه‌گاه را نمایش می‌دهد. در مقطع قبل از تکیه‌گاه و به محض رسیدن به آن، سرعت متوسط افزایش و عرض مقطع کاهش می‌یابد که موجب تغییر در الگوی جریان در اطراف این سازه می‌گردد. در پایین‌دست تکیه‌گاه، جریان‌های چرخشی ایجاد شده‌اند. در نزدیکی دیواره‌های قائم تکیه‌گاه یک حرکت مارپیچی شدید ناشی از جریان‌های برگشتی در نزدیکی بستر وجود دارد. شکل (۱۵-الف) ویسکوزیته آشفتگی را

شکل (۱۲) کانتورهای سرعت در سه راستای x ، y و z در مدل‌ها، در اطراف تکیه‌گاه جای‌گیری شده در محدوده طولی $۵/۴$ تا $۶/۱۵$ متر از ابتدای کانال و نیز تغییرات جریان در محدوده عرض کانال یک متری با اعمال ارتفاع ثابت $۰/۰۵$ متر را نمایش می‌دهند. در شکل (۱۲-الف) تغییرات مؤلفه طولی سرعت جریان (u) در کانال نشان داده شده است. در ابتدای کانال و قبل از رسیدن جریان به تکیه‌گاه مستطیلی، سرعت تقریباً یکنواخت و بدون اغتشاش با بزرگی $۰/۲۵۶$ متر بر ثانیه مسیر خود را طی می‌کند. در مجاورت تکیه‌گاه مستطیلی بزرگی سرعت به $۰/۰۳۲$ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. با رسیدن به تکیه‌گاه و برخورد با گوشه بیرونی و سمت چپ یعنی همان بالادست مسیر، جریان به صورت متلاطم با رسیدن به حداکثر مقدار سرعت خود یعنی $۰/۴۴۹$ متر بر ثانیه از تکیه‌گاه عبور می‌کند و به سمت مقادیر کمتر و تقریباً $۰/۳۵۲$ متر بر ثانیه پیش می‌رود. در مجاورت دیواره تحتانی کانال، جریان برگشتی، تشکیل گردابه‌ها و سرعت منفی مشاهده می‌شود که بیشینه مقدار منفی برابر با $۰/۱۲۹$ متر بر ثانیه شده است. شکل (۱۲-ب) مؤلفه عرضی سرعت جریان (v) را نشان می‌دهد که در آن جریان از ابتدای عرض محدوده مورد مطالعه بدون در نظر گرفتن علامت، تقریباً یکنواخت بوده و بین مقادیر $۰/۰۴۱$ تا $۰/۰۸۰$ متر بر ثانیه متغیر است. حداکثر بزرگی سرعتی برابر با $۰/۲۶۶$ متر بر ثانیه در گوشه بیرونی و سمت چپ تکیه‌گاه ملاحظه می‌شود. از تقریباً $۶/۲$ متری ابتدای کانال به سمت پایین‌دست کانال گردابه‌های دورانی تشکیل شده‌اند که در نتیجه آن کاهش سرعت و رسیدن آن به مقدار $۰/۰۲۰$ متر بر ثانیه قابل مشاهده است. همچنین روند کاهشی این مقدار تا انتهای محدوده مورد مطالعه ادامه داشته و نهایتاً به بیشینه مقدار خودش یعنی منفی $۰/۰۴۱$ می‌رسد. شکل (۱۲-ج) مؤلفه سوم سرعت جریان (w) را نشان می‌دهد. طبق کانتور به دست آمده، تقریباً در تمام محدوده مورد بررسی مقدار بزرگی سرعت برابر با $۰/۰۰۶۴۵$ متر بر ثانیه می‌باشد. این مقدار در بالادست کانال از شدت بیشتری برخوردار است و هرچه به

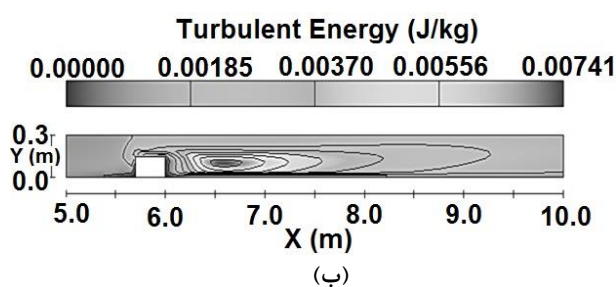
پایین دست کانال سیر صعودی انرژی جنبشی آشفتگی جریان مشهود است به نحویکه مقدار $0/00185$ ژول بر کیلوگرم را رد کرده و به مقدار $0/00370$ ژول بر کیلوگرم و نهایتاً به بیشینه مقداری برابر با $0/00741$ ژول بر کیلوگرم در حدوداً $6/7$ متری ابتدای کانال می‌رسد.



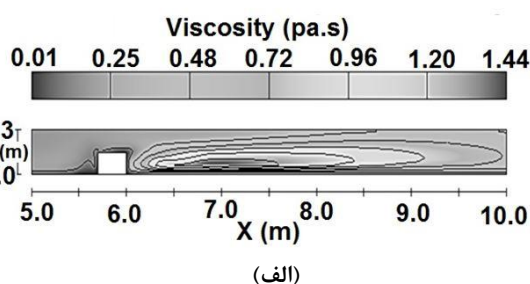
شکل (۱۳): بردارهای سرعت و نحوه تشکیل گردابها



شکل (۱۴): نمایش خطوط جریان



(ب)



(الف)

شکل (۱۵): (الف) ویسکوزیته آشفتگی جریان،

(ب) تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی جریان

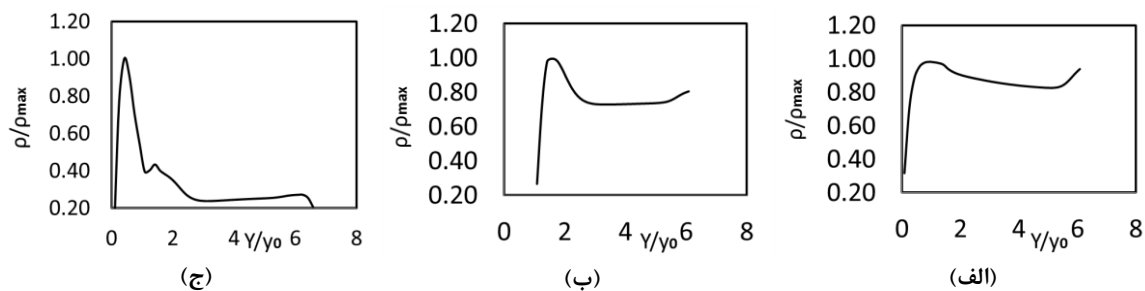
(الف) مشاهده می‌شود. از دیواره تحتانی کانال به سمت بالا، نمودار سیر صعودی داشته و تقریباً در محدوده $0/15$ متری از ابتدای عرض کانال بیشترین مقدار ویسکوزیته و به‌طور تقریبی برابر با $0/217$ پاسکال

اطراف تکیه‌گاه نمایش می‌دهد. خاصیتی که مقاومت داخلی سیال را در برابر جاری شدن بیان می‌کند. به عبارتی ویسکوزیته آشفتگی، بیان‌گر نسبت تنش برشی به سرعت برشی و در واقع مقاومت سرعت بین دو لایه سیال (که بستگی به جابه‌جایی خطی آن‌ها دارد) می‌باشد. در بالادست و قبل از رسیدن جریان به تکیه‌گاه، مقدار ویسکوزیته آشفتگی بین مقادیر $0/25$ تا $0/48$ پاسکال ثانیه می‌باشد که این مقدار بلافاصله پس از رسیدن جریان به تکیه‌گاه به $0/01$ پاسکال ثانیه، کاهش می‌یابد. آشفتگی ایجاد شده در اطراف تکیه‌گاه، موجب آن گردیده که سیال حرکت آرام خود را از دست بدهد. این ناحیه ممکن است دارای زیر لایه‌ای باشد که در آن هنوز حرکت سیال آرام باشد. با عبور جریان از حوالی تکیه‌گاه و نزدیک شدن آن به پایین دست، بر بزرگی ویسکوزیته افزوده می‌شود و در واقع با متلاطم شدن جریان و نیز تشکیل گرداب‌های برگشتی، مقاومت سیال در برابر تنش برشی افزایش می‌یابد که بیشترین حد آن در ناحیه‌ای به مرکزیت مختصه طولی تقریباً 7 متری ابتدایی کانال و برابر با مقدار $1/44$ پاسکال ثانیه شده است. شکل (۱۵-ب) انرژی جنبشی آشفتگی را نمایش می‌دهد. در ناحیه بالادست تکیه‌گاه، انرژی جنبشی آشفتگی مقادیر بین صفر تا $0/00185$ ژول بر کیلوگرم را دارد. به سمت

در اشکال (۱۶) تا (۱۸)، بعد سوم ثابت ($0/05$ متر) و محدوده y بین $0/05$ تا $0/9$ متر می‌باشد. نمودار ویسکوزیته آشفتگی جریان در مقطع قبل از تکیه‌گاه ($X=540$ cm) در مدل RNG در شکل (۱۶-)

ثانیه و از این نقطه به سمت انتهای عرض کانال، نمودار سیر نزولی خواهد داشت. به مرور و با حرکت به سمت دیواره فوقانی کانال تا حدود ۰/۸ متری از ابتدا، کاهش ویسکوزیته را مشاهده می‌کنیم به طوری که تقریباً در محدوده ۰/۴۵ تا ۰/۷۵ متری از ابتدای عرض کانال کمینه مقدار ویسکوزیته و حدوداً برابر با ۰/۱۸۰ پاسکال ثانیه را خواهد داشت. در واقع مقاومت جریان در برابر تنش برشی در مقطع قبل از تکیه‌گاه مستطیلی در راستای عرض کانال تا ۰/۱۵ متری ابتدایی به سمت بیشینه مقدار خود در حرکت است و با دور شدن از حوالی تکیه‌گاه، از این مقاومت کاسته می‌شود. در شکل (۱۶-ب)، نمودار ویسکوزیته آشفتگی جریان در مقطع میانی تکیه‌گاه ($X=585 \text{ cm}$) ملاحظه می‌شود. با توجه به نمودار در راستای عرض کانال، مقدار ویسکوزیته تقریباً از ۰/۱۸ متری ابتدای کانال، به صورت صعودی تا رسیدن به مقدار بیشینه ۰/۲۳۰ پاسکال ثانیه در محدوده ۰/۳ متری از ابتدای عرض کانال ادامه داشته و از این نقطه به بعد یعنی از

۰/۴۵ تا ۰/۹ متری دیواره تحتانی کانال، سیر نزولی را طی می‌کند. در این مسیر کاهشی، کمینه مقداری برابر با ۰/۱۷۲ پاسکال ثانیه را خواهد داشت. در واقع مقاومت جریان در برابر تنش برشی در مقطع وسط تکیه‌گاه یا به عبارتی در محدوده جلوی تکیه‌گاه، دچار اغتشاش و آشفتگی چشم‌گیر و متعاقباً در ابتدا افزایش و بلافاصله دچار کاهشی ناگهانی شده است. شکل (۱۶-ج)، نمودار ویسکوزیته آشفتگی جریان در مقطع بعد از تکیه‌گاه ($X=615 \text{ cm}$) در مدل RNG را نشان می‌دهد. مقدار ویسکوزیته آشفتگی از ابتدای دیواره تحتانی کانال در حال افزایش به سمت بیشینه مقدار ۰/۶۷ پاسکال ثانیه و تقریباً در ۰/۱۵ متری دیواره تحتانی کانال می‌باشد. پس از آن، نزول نمودار به سمت انتهای عرض کانال را خواهد داشت. کمینه مقدار ویسکوزیته تقریباً برابر با ۰/۱۶ پاسکال ثانیه در محدوده ۰/۴۵ تا ۰/۹ متری از دیواره تحتانی کانال می‌باشد.



شکل (۱۶): ویسکوزیته آشفتگی جریان در مقاطع مختلف (الف) $X=540 \text{ cm}$ (ب) $X=585 \text{ cm}$ (ج) $X=615 \text{ cm}$

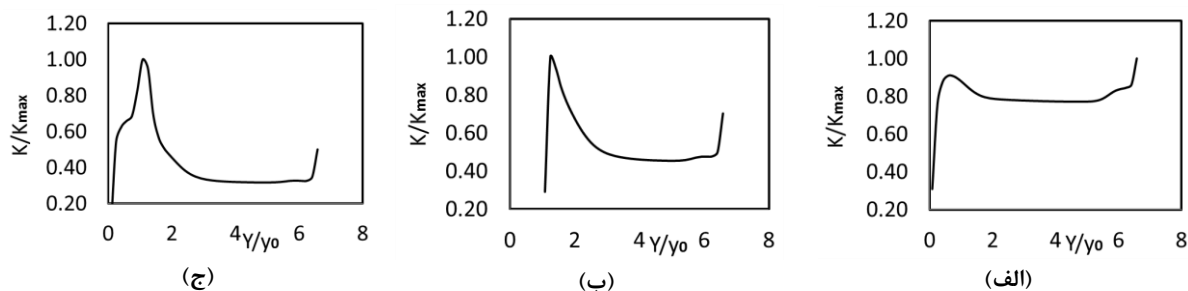
مقدار آشفتگی از ابتدای عرض کانال به سمت بالا، یک سیر صعودی را طی می‌کند تا به حداکثر مقدارش یعنی ۱/۱۷ ژول بر کیلوگرم در محدوده ۰/۱۵ متری دیواره تحتانی کانال می‌رسد. از آن پس کاهش انرژی آشفتگی تا مقدار ۱/۰۴ ژول بر کیلوگرم را خواهد داشت. این مقدار تقریباً از ۰/۴۵ تا ۰/۷۵ متری عرض کانال ثابت است و دوباره از ۰/۸ متری به بعد افزایش می‌یابد. در ناحیه بالادست تکیه‌گاه، نوسانات و تلاطم جریان قابل توجه می‌باشد. نمودار انرژی آشفتگی جریان در $X=585 \text{ cm}$ در مدل RNG

انرژی آشفتگی جریان در $X=540 \text{ cm}$ در مدل RNG در شکل (۱۷-الف) نشان داده شده است. معادله معرف این پارامتر طبق رابطه (۱۰) می‌باشد. در آن تغییرات مؤلفه سرعت در سه راستای طولی و عرضی و عمقی نشان داده شده‌اند.

$$K = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (10)$$

مدل RNG را نمایش می‌دهد. بزرگی انرژی آشفتگی از ابتدای عرض کانال تا $0/18$ متری آن، به صورت صعودی ادامه دارد. این سیر افزایشی با مقدار انرژی آشفتگی‌ای برابر با تقریباً $3/59$ ژول بر کیلوگرم امتداد می‌یابد. سپس کاهش انرژی را دارد تا اینکه به مقدار ثابت $1/10$ ژول بر کیلوگرم می‌رسد و از $0/4$ تا $0/8$ متری عرض کانال ثابت بوده سپس افزایشی ناچیز خواهد داشت. در مقطع پایین دست تکیه‌گاه، در $0/2$ متری ابتدایی، افزایش اغتشاش و تلاطم جریان، به‌طور قابل توجهی مشهود است که متعاقباً منجر به تشکیل گردابه‌ها و جریانات برگشتی خواهد شد.

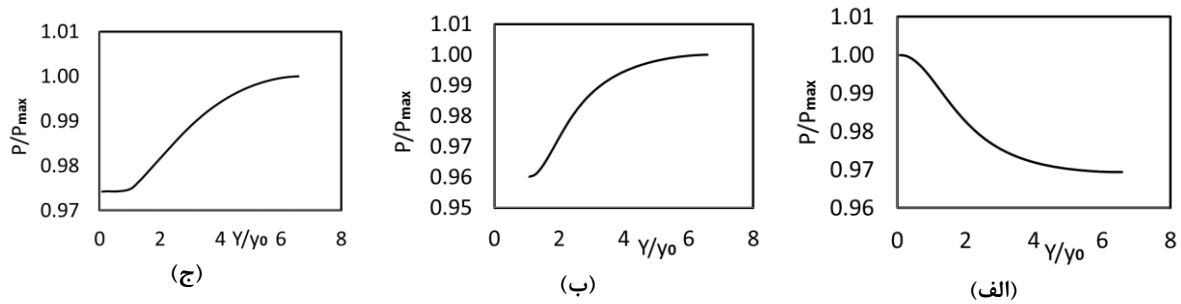
در شکل (۱۷-ب) ملاحظه می‌شود. با توجه به شکل، مقدار بیشینه جریان آشفته قبل از $0/18$ متری از ابتدای عرض کانال با مقداری حدوداً برابر با $0/0245$ ژول بر کیلوگرم اتفاق افتاده است. پس از آن نمودار به شکل نزولی تا کمینه مقدارش که برابر با $0/011$ ژول بر کیلوگرم در نواحی $0/45$ تا $0/9$ متری از دیواره تحتانی کانال می‌باشد، ادامه یافته است. از این نقطه به بعد مجدداً، انرژی آشفتگی جریان افزایش می‌یابد. بزرگی انرژی آشفتگی و تلاطم ایجاد شده در جریان در محدوده جلوی تکیه‌گاه قابل توجه بوده و کاهش ملایم آن تا نواحی انتهایی عرض کانال، نشان از تداوم اغتشاش جریان در حوالی تکیه‌گاه دارد. شکل (۱۷-ج)، انرژی آشفتگی جریان در $X=615$ cm



شکل (۱۷): انرژی آشفتگی جریان در مدل RNG (الف) $X=540$ cm (ب) $X=585$ cm (ج) $X=615$ cm

کمینه مقدارش در مجاورت دیواره پایینی کانال که تقریباً برابر با 855 پاسکال می‌باشد تا بیشینه آن یعنی مقدار 890 پاسکال در مجاورت دیواره انتهایی عرض کانال امتداد یافته است. تغییرات فشار جریان در $X=615$ cm در مدل RNG در شکل (۱۸-ج)، ملاحظه می‌شود. در مقطع پایین دست تکیه‌گاه، فشار جریان در $0/1$ متری ابتدایی کانال ثابت و برابر با 860 پاسکال می‌باشد. از نقطه $(0/05, 0/1, 6/15)$ شروع به افزایش کرده و در مجاورت دیواره انتهایی کانال به بیشینه مقداری حدوداً برابر با 884 پاسکال می‌رسد.

شکل (۱۸-الف)، تغییرات فشار جریان در مدل RNG $X=540$ cm را نشان می‌دهد. در مقطع بالادست تکیه‌گاه، نمودار گویای سیر نزولی فشار جریان از ابتدای عرض کانال به سمت انتها می‌باشد. بیشینه مقدار فشار تقریباً برابر با 933 پاسکال در مجاورت دیواره تحتانی کانال رخ داده است. کاهش فشار تا نقطه $(0/05, 0/9, 5/4)$ با مقداری حدوداً برابر با 906 پاسکال ادامه یافته است. تغییرات فشار جریان در $X=585$ cm در مدل RNG در شکل (۱۸-ب)، نمایش داده شده است. تغییرات فشار جریان در مقطع میانی تکیه‌گاه، به صورت افزایشی می‌باشد. از



شکل (۱۸): تغییرات فشار در مدل RNG (الف) $X=540$ cm، (ب) $X=585$ cm، (ج) $X=615$ cm

نتیجه‌گیری

تحلیل و تفسیر هیدرولیک جریان و نوسانات پارامترهای آن راهکاری اساسی در تخمین و پیش‌بینی میزان تخریب و آبستگي احتمالی سازه‌های هیدرولیکی واقع در مسیر جریان می‌باشد. در این تحقیق قابلیت شبیه‌سازی عددی جریان اطراف تکیه‌گاه مستطیلی به صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D و مدل‌های آشفتگی LES، RNG و K- ϵ بررسی شد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. بررسی‌های انجام شده نشان داد که مدل آشفتگی RNG در مقایسه با دو مدل LES و K- ϵ برای پیش‌بینی مؤلفه سرعت جریان در کانال مستطیلی مناسب‌تر است که از این لحاظ با تحقیقات مشابه (رمضانی و باباگلی سفیدکوهی، ۱۳۹۵؛ معیری و همکاران، ۱۳۹۲ و Karami et al., 2014) مطابقت دارد. در این مدل آشفتگی مقدار R^+ برابر $0/9634$ و مقدار خطای مدل برابر $0/02$ و $0/03$ به دست آمد. از آنجا که مدل RNG پارامتر سرعت را بهتر و با خطای کمتری نسبت به دو مدل دیگر شبیه‌سازی می‌نماید لذا در چنین مقاطعی استفاده از آن جهت شبیه‌سازی سرعت جریان توصیه می‌گردد. ارزیابی‌های به عمل آمده حاکی از آن است که مطابقت خوبی بین پروفیل‌های شبیه‌سازی شده سرعت با مقادیر آزمایشگاهی وجود دارد و آنچه از هیدرولیک جریان که در مطالعات قبلی تمرکز زیادی روی آنها نشده در این مقاله به آن پرداخته شده است. در تفاسیر انجام شده نتیجه این شد که:

- ۱- نحوه جهت‌گیری بردارهای سرعت و تراکم خطوط جریان در حوالی تکیه‌گاه که نقش مانعی بر مسیر جریان را دارد و به‌خصوص پایین‌دست تکیه‌گاه و به‌دنبال آن ایجاد گردابه‌های برگشتی و افزایش اغتشاشات نشان دادند که ضروری است هندسه و محل جای‌گیری مانع مدنظر قرار گیرد.
- ۲- ویسکوزیته آشفتگی و نیز انرژی آشفتگی جریان نیز در پایین‌دست تکیه‌گاه مستطیلی به بیشینه مقدارشان رسیده و تأثیر حضور مانع را نشان دادند. با تحلیل مهندسی مکان تکیه‌گاه و ابعاد آن می‌توان از تلاطم بیش از حد جریان و در نتیجه تخریب سازه هیدرولیکی تا حد ممکن جلوگیری به عمل آورد.
- همچنین نمودارهای ویسکوزیته آشفتگی، انرژی آشفتگی و فشار بیان‌گر آن بودند که:
- ۳- در مقطع بعد از تکیه‌گاه، هم‌زمان با افزایش تلاطم و منفی شدن سرعت و کاهش بزرگی آن، نسبت تنش برشی به سرعت برشی یا همان ویسکوزیته آشفتگی سیر افزایشی تا $0/67$ پاسکال ثانیه را دارد. کمینه مقدار ویسکوزیته آشفتگی هم مربوط به مقطع قبل از تکیه‌گاه و برابر با $0/217$ پاسکال ثانیه می‌باشد.
- ۴- نتایج انرژی آشفتگی نیز نشان دادند که مقطع میانی تکیه‌گاه کمترین و مقطع بعد از آن، بیشترین اغتشاش یعنی به ترتیب $0/0245$ و $3/59$ ژول بر کیلوگرم را متحمل می‌شوند.
- ۵- تغییرات فشار حول تکیه‌گاه، حاکی از آن بود که فشار بیشینه به مقدار 933 پاسکال در مقطع قبل

از تکیه‌گاه و مقدار کمینه آن در مقطع بعد از تکیه‌گاه و برابر با ۸۶۰ پاسکال اتفاق می‌افتد.

منابع

- حسینی، ه. ن. هاتف و ن. طالب‌بیدختی. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی سه‌بعدی حفره آبشستگی اطراف تکیه‌گاه پل با دیواره‌ی قائم با نرم‌افزار FLOW-3D. نشریه مهندسی عمران شریف، دوره ۳۰-۲، شماره ۲، ص ۱۱۷-۱۲۳.
- خزیمه‌نژاد، ح. م. قمشی، م. شفاعی بجستان و ی. رضانی. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل با مقطع مستطیلی. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، دوره ۲۲، شماره ۱، ص ۹۱-۱۱۰.
- 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، دوره ۲۶، شماره ۲، ص ۹۵-۱۰۹.
- زرانی، ا. ر. مترجم. ۱۳۸۱. نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی پل‌ها. انتشارات دانشگاه امیرکبیر.
- قاسم‌زاده، ف. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی مسائل هیدرولیکی در FLOW-3D. انتشارات نوآور، چاپ دوم.
- معیری، م. ع. حسین زاده دلیر، ف. سلماسی، د. فرسادی زاده، س. ع. اشرف صدرالدینی. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی دوبعدی جریان در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل‌های آشفتگی و مقایسه نتایج با مدل فیزیکی. نشریه دانش آب و خاک، دوره ۲۳، شماره ۱، ص ۱-۱۴.
- Barbhuiya, A.K., S. Dey. 2004. Measurement of turbulent flow field at a vertical semicircular cylinder attached to the sidewall of a rectangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(2): 87-96.
- Barbhuiya, A.K., S. Dey. 2004. Turbulent flow measurement by the ADV in the vicinity of a rectangular cross-section cylinder placed at a channel sidewall. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(4): 221-237.
- Basser, H., R. Cheraghi., H. Karami, A. Ardeshir, M. Amirmojahedi, S.h. Akib, A. Jahangirzade, S.h. Shamsirband. 2015. Modeling sediment transport around a rectangular bridge abutment. *Environmental Fluid Mechanics*, 15(6): 1105-1114.
- Dey, S., Y.M. Chiew, M.S. Kadam. 2008. Local scour and riprap stability at an abutment in a degrading bed. *Journal of Hydraulic Engineering*. American Society of Civil Engineers. 134(10): 1496-1502.
- 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 Journal of Civil Engineering*. 20(5): 2070-2081.
- Karami, H., H. Basser. A. Ardeshir, S.H. Hosseini. 2014. Verification of numerical study of scour around spur dikes using experimental data. *Water and Environment Journal*. 28(1): 124-134.
- Kumcu, S. Y., M. A. Kokpinar. M. Gogus. 2014. Scour Protection around Vertical-Wall Bridge Abutments with Collars. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 18(6): 1884-1895.
- Rahimzadeh, H., R. Maghsoodi, H. Sarkardeh, S. Tavakkol. 2012. Simulating Flow Over Circular Spillways by Using Different Turbulence Models. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 6(1): 100-109.
- Oben-Nyarko, K., R. Ettema. 2011. Pier and Abutment Scour Interaction. *Journal of Hydraulic Engineering*. 137(12): 1598-1605.
- Sajjadi, S. A. H., S. H. Sajjadi, H. Sarkardeh. 2016. Accuracy of Numerical Simulation in Asymmetric Compound Channels. *International Journal of Civil Engineering*. 1-13.
- Smith, H. D. 2004. Modeling the flow and scour around an immovable cylinder. MS thesis. The Ohio State University.

Three-dimensional Analysis of the Effect of Attached-Abutment to the Channel Wall on the Hydraulic Parameters of Flow, Using Flow-3D Software

Hojat Karami¹, Khosrow Hosseini², Saeed Farzin³, Mohamadreza Nikpour⁴, Somayeh Anjomrooz⁵

Abstract

In the present research, three-dimensional flow in a rectangular channel, containing a bridge abutment, was simulated by using flow-3D software. For validation of the numerical results, three-dimensional components of flow velocity in the vicinity of the abutment were obtained from an experimental test. After comparison of the measured and numerical results, it was shown that RNG performed better ($R^2=0.963$, $RMSE=0.02$ and $MAE=0.03$) than the other two turbulence models (LES and $k-\epsilon$). The optimum mesh size was chosen based on the above results. Results revealed that it is necessary to consider return vortices and fluctuations in flow velocity in the vicinity of the abutment, especially in the downstream, for proper design and location of abutment geometry. Viscosity and energy of flow turbulence in the downstream of the rectangular abutment reached their maximum value and existence of the obstacle was more pronounced. It was shown that in the section after the abutment, simultaneous reduction of velocity and becoming negative, the viscosity had an increasing trend and reached up to 0.67 Pa sec. The section located in the middle of the abutment had minimum turbulence energy (0.00245 J/kg) and the next section had maximum turbulence energy (3.59 J/kg). Pressure variations around the abutment showed that maximum pressure (933 Pa) occurred in the previous section and minimum pressure (860 Pa) was seen after the abutment.

Keywords: Flow hydraulic parameters, Rectangular abutment, Turbulent models, Flow-3D, RNG.

¹ Assistant professor, Civil Engineering Faculty, Semnan University, hkarami@semnan.ac.ir

² Assistant professor, Civil Engineering Faculty, Semnan University, khoseini@semnan.ac.ir

³ Assistant professor, Civil Engineering Faculty, Semnan University, saeed.farzin@semnan.ac.ir

⁴ Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, m_nikpour@uma.ac.ir

⁵ M.Sc. student, Civil Engineering Faculty, Semnan University, s.anjomrooz@semnan.ac.ir