



شبیه سازی عددی سرعت جریان در اطراف پایه های پل تکی و دو قلو با چیدمان های مختلف با استفاده از مدل فلونت

زهرا بهروزی، حسین حمیدی فر*، سید محمدعلی زمردیان

بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۸
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۱۱
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۳
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱

کلمات کلیدی:

رودخانه، سرعت جریان
سیلاب
شبیه سازی عددی
فلونت
میدان جریان

خلاصه: ساختار جریان در اطراف پایه پل بسیار پیچیده است. به دلیل شرایط خاص هندسی و سازه ای برخی موارد ایجاد می نماید که پایه ها به صورت دوتایی با چیدمان های خاص کنار یکدیگر قرار گیرند که این امر منجر به پیچیده تر شدن ساختار جریان اطراف پایه می شود. در این پژوهش، تغییرات سرعت جریان و انرژی جنبشی آشفتنه اطراف تک پایه و گروه پایه های پل دوتایی با مقطع دایره، در حالتی که پایه ها به سه صورت پشت سر هم، کنار هم و زاویه دار نسبت به جهت جریان قرار گرفته اند، با استفاده از نرم افزار فلونت شبیه سازی شده است. مولفه های سه بعدی سرعت، خطوط جریان و خطوط هم تراز سرعت برای هر دو حالت تک پایه و دو پایه بررسی شده اند. با مقایسه مقادیر سرعت طولی بین داده های آزمایشگاهی و شبیه سازی شده در دو مقطع عرضی انتخابی، خطای میانگین برای مدل تک پایه برابر با ۷/۳ درصد و برای مدل دو پایه پشت سر هم برابر با ۳/۵۴ درصد به دست آمد. همچنین مقدار مولفه طولی سرعت در مدل دو پایه پشت سر هم، دو پایه کنار هم و مدل زاویه دار نسبت به تک پایه به ترتیب ۲/۳۴٪ و ۹/۲۷٪ کاهش و ۸/۸۷٪ افزایش داشته است. به طور کلی، به دلیل وقوع کمینه مقادیر سرعت و انرژی جنبشی آشفتنه، مناسب ترین حالت قرارگیری پایه ها در مسیر جریان به صورت کنار هم توصیه می شود.

۱- مقدمه

پل ها از اصلی ترین اجزاء راهها به عنوان مهمترین شریان ارتباطی بین جوامع بشری هستند. سالانه بسیاری از پل ها در اثر پدیده آبستستگی و لغزش پایه ها در مواقع سیلابی که شریان های ارتباطی به مناطق سیل زده هستند، تخریب می شوند و دسترسی و امداد رسانی به مناطق سیل زده با مشکلات مواجه می شود که بیانگر اهمیت بررسی این پدیده است. همچنین پل ها یکی از سازه های تأثیرگذار در هیدرولیک و مورفولوژی رودخانه ها هستند [۱]. میدان جریان سه بعدی و الگوی آبستستگی اطراف پایه پل به دلیل وجود سیستم های گردابی و اندرکنش هیدرودینامیکی جریان با بستر قابل فرسایش، پیچیده می باشد؛ اما میدان جریان و روند آبستستگی اطراف پایه های مجاور هم، تحت تأثیر مکانیزمهایی است که آن را نسبت به تک پایه پیچیده تر و عمق و شکل آبستستگی را متفاوت میسازد [۲]. تحقیقات زیادی به منظور شناخت جریان در اطراف سازه های هیدرولیکی انجام شده است [۳] و همچنین مطالعه جریان در اطراف پایه های پل دارای سابقه طولانی

است و عمدتاً بر روی جریانهای دائمی در حضور تک پایه انجام گرفته است [۵-۸]. همچنین مطالعات ارزنده ای در این زمینه به صورت عددی انجام شده است [۹-۱۱].

محققین بسیاری از گذشته تاکنون با روشهای آزمایشگاهی و عددی سعی در بررسی ساختار جریان اطراف پایه های پل داشته اند. در یک مطالعه آزمایشگاهی توسط باربویا و دی^۱ با استفاده از سرعت سنج صوتی میدان جریان متلاطم سه بعدی اندازه گیری شد. در آن مطالعه، مؤلفه های سرعت لحظه ای، مؤلفه های شدت آشفتگی، انرژی جنبشی آشفتگی و تنشهای رینولدز در صفحاتی که با زوایای مرکزی متفاوت نسبت به مرکز استوانه در نظر گرفته شده بودند، مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج حاصل از آن پژوهش وجود جریانهای گردابی اولیه در بالادست استوانه را نشان داد [۱۲].

تأثیر شکل پایه پل بر الگوی جریان اطراف آن با استفاده از نرم افزار فلونت در یک پژوهش توسط حسنزاده و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش الگوی جریان اطراف پایه هایی با مقاطع دایره، دوکی،



بیضی، مربعی و ترکیبی (دایره-مستطیل) به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شد. بررسی نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش طولی مقاطع، طول گردابه‌ها کوچک‌تر شده، این گردابه‌ها در مقطع ترکیبی (دایره-مستطیل) نسبت به مربع و مستطیل کمتر بوده و در پشت پایه دوکی شکل هیچگونه جریان برگشتی که خود عامل آبستگی است ایجاد نمیشود. در پژوهشی دیگر توسط پوراحمدی و حکیمزاده، تأثیر مدل‌های آشفتگی در مدلسازی عددی دو بعدی در پلان الگوی جریان حول پایه استوانه ای در کانال مستطیلی با بستر صلب با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت مورد بررسی قرار گرفت. ایشان نشان دادند که مدل تنش رینولدز (RSM) به خوبی جدایش جریان در اطراف پایه و جریانهای گردابه ای پشت پایه را پیشبینی مینماید [۱۱].

بشارتی گیوی و حکیمزاده به بررسی عددی سه بعدی الگوی جریان و تنش برشی بستر اطراف پایه با مقطع متغیر از کف تا سطح با استفاده از نرم‌افزار Fluent پرداخته‌اند. ایشان نتیجه گرفتند یکی از روش‌های کاهش آبستگی، کاستن از تنشهای برشی حداکثر بستر در مجاورت پایه است. به کارگیری پایه‌های مخروطی منجر به کاستن از تنشهای برشی در مجاورت پایه میشود [۱۰]. همچنین جریان اطراف پایه با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت به صورت دو بعدی توسط نائینی و فضلی شبیه سازی شد و میزان اثرگذاری شکل پایه بر روی الگوی شکل گیری جریان، بزرگی گردابه‌ها و پارامترهای شکست گردابه از جمله ضریب درگ و ضریب لیفت مورد بررسی قرار گرفت. ایشان نتیجه گرفتند که در حالت هایی که دماغه تیز گوشه است، جریان به نحو بهتری از سطح جدا می شود. در مقابل وقتی دماغه گرد گوشه باشد، گردابه‌های جدا شده از سطح، پدیده شکست گردابه را شکل میدهد. در مورد پایه مربعی نیز مشاهده می شود که شدت وقوع پدیده شکست گردابه بسیار زیاد است. این موضوع نشان دهنده نیروهای زیاد نوسانی به این پایه می باشد. در حالت اصابت مایل، کمترین مقدار ضریب درگ و لیفت برای پایه مستطیلی با یک دماغه گرد گوشه و یک دماغه تیز گوشه، در حالتی که دماغه گرد گوشه مقابل جریان قرار داده شده به دست آمده است. در حالت دماغه تیز گوشه، خطوط جریان تقریباً تا انتهای پایه از سطح جدا نمی شود. بنابراین گردابه‌ها در پشت پایه تشکیل نشده و پدیده شکست گردابه^۱ تا حد زیادی متوقف می شود [۱۳].

یک مدل عددی سه بعدی برای حل معادلات ناویر استوکس با استفاده از مدل آشفتگی k-ε توسط بارانیا و همکاران^۲ توسعه یافت. ایشان نتایج مدل خود را با نتایج حاصل از مدل فیزیکی میدان جریان اطراف استوانه های

- 1 -Failure vortex
- 2 -Baranya et. al

مجزا و دوتایی در بستر مسطح مقایسه کردند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی شده از سرعت جریان، انرژی سینماتیک آشفته و توزیع تنش برشی کف، همپوشانی خوبی با مقادیر اندازه گیری شده دارند [۱۴]. عطایی آشتیانی و اصلانی کردکندی به بررسی الگوی جریان اطراف تک‌پایه و دو پایه پشت سر هم در بستر زبر پرداختند. آن‌ها سرعت جریان را با استفاده از دستگاه ADV اندازه گیری کردند. نتایج نشان داد که حضور پایه پایبندست، ساختار جریان را تا حد زیادی به ویژه در ناحیه نزدیک گردابه های جریان تغییر می دهد. درون ناحیه بین دو پایه‌ها، یک جریان رو به بالای قوی و قابل توجهی شکل می گیرد، هر چند یک انحراف جریان عرضی ضعیفی در مقایسه با تک پایه ایجاد می شود. نتایج نشان داد که قدرت ساختار گردابه ها در پایه های پشت سر هم در مقایسه با تک‌پایه کاهش می یابد. این نتیجه نشان می دهد که تشکیل جریان با اعداد رینولدز مختلف در عمق جریان به خاطر زبری بستر است، همچنین فاصله بین پایه ها در مورد پایه های پشت سر هم می تواند بر رژیم جریان تأثیر بگذارد [۱۵].

ساختار جریان متلاطم اطراف گروه پایه پل با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی توسط هاشمی و همکاران بررسی شد. به این منظور از نرم‌افزار Flow 3d که قابلیت مدل کردن جریان به صورت سه بعدی را دارد برای شبیه‌سازی الگوی جریان تلاطمی در اطراف پایه پل استفاده شد. به منظور صحت‌سنجی نرم‌افزار، مطالعه الگوی جریان در اطراف تک‌پایه با مدل آشفتگی دو معادله‌ای k-ε انجام گرفت. همچنین دو مدل آشفتگی RNG و k-ε برای شبیه‌سازی الگوی جریان اطراف گروه پایه دوتایی پشت سر هم به کار گرفته شد. هر دو بررسی بر روی بستر ثابت و بدون چاله آبستگی انجام شد. در ادامه از مدل RNG برای مطالعه الگوی جریان تلاطمی در حرکت ذرات اطراف گروه پایه دوتایی و بر روی بستر ثابت در حضور چاله آبستگی استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی سرعت و خطوط جریان در اطراف گروه پایه دوتایی با به کارگیری مدل آشفتگی RNG نسبت به مدل k-ε به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر بود. همچنین این بررسی نشان داد که نتایج شبیه‌سازی مطابقت مناسبی را با نتایج واقعی داشته که نمایانگر قابلیت بالای مدل شبیه‌سازی در پیش‌بینی جریان اطراف تک‌پایه و گروه پایه پل دارد [۱۶]. همچنین کاردان و همکاران میدان جریان اطراف مدل پایه های پل را به صورت سه بعدی با نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی و اثر شکل پایه بر کاهش تنش برشی بستر را بررسی کردند [۱۷].

هوشمند و همکاران جریان اطراف پایه های پل مستقر در کانالهای خمیده را به صورت سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت مدلسازی کردند.

۲- مواد و روش‌ها

بدون شک با پیشرفت کامپیوترها از نظر سرعت، روش‌های عددی، امکان حل معادلات حاکم بر جریان سیالات را به روش‌های دقیقتری میسر ساخته است و از این نظر روز به روز روش‌های عددی در علوم مهندسی آب طرفداران زیادیتری را به سبب صرفه جویی در هزینه و وقت پیدا کرده است. نرم افزارهای زیادی نیز به بازار معرفی شده‌اند که با الگوریتم‌های قوی به کار رفته در آن‌ها برای حل معادلات جبری، پشتوانه بسیار خوبی را برای مهندسیین هیدرولیک فراهم کرده است [۲۰]. از جمله این نرم افزارها، نرم افزار تجاری فلوئنت است که به زبان C نوشته شده است و معادلات حاکم را با روش احجام محدود به معادلات جبری تبدیل کرده است و آن‌ها را حل می‌کند. بسیاری از جریان‌های شناخته شده در هیدرولیک از جمله جریان‌های چند فازی در امکانات حل این نرم افزار گنجانده شده است. برای حل یک مسئله CFD ابتدا باید شبکه حل تولید شود. فلوئنت، خود شبکه را تولید نمی‌کند و شبکه باید در نرم افزار دیگری تولید شود. بعد از اینکه شبکه حل در نرم افزار مثل Gambit تولید شد و نوع مرزهای محدوده حل مانند دیواره، ورودی و خروجی مشخص شد، مش تولید شده باید توسط نرم افزار فلوئنت خوانده شود و برای اشکالات احتمالی از قبیل حجم‌های منفی کنترل شود.

معادلات حرکت سیالات غیر قابل تراکم را معادلات ناویر استوکس گویند که از ترکیب معادلات حرکت سیال در سه راستای x ، y و z با معادله پیوستگی و ساده سازی به دست می‌آیند. در حل مسائل مختلف چهار مجهول (u, v, w, p) وجود دارد که از ترکیب این سه معادله (ناویراستوکس) به همراه معادله پیوستگی استفاده می‌شود. این معادلات برای سیال با نماد تانسوری به صورت زیر بیان می‌شوند:

۲-۱- معادله پیوستگی

اصل اساسی که از آن در مکانیک سیالات استفاده می‌شود اصل بقاء جرم است. این اصل بیان می‌دارد که جرم نه تولید می‌شود و نه از بین می‌رود و توسط معادله پیوستگی بیان می‌گردد.

۲-۲- معادله مومنتوم

مکانیک سیالات تنها با داشتن معادله پیوستگی مشخص نمی‌شود بلکه باید اصل بقاء اندازه حرکت یا قانون دوم نیوتون را درباره آن بیان کرد. اندازه حرکت، حاصل ضرب جرم در سرعت است. قانون دوم نیوتون بیان می‌کند که برآیند نیروهایی که بر یک جسم اثر می‌کند برابر است با تغییرات خالص

از سه مدل آشفتگی $k-\epsilon$ ، $k-\omega$ و RSM استفاده شد. جهت صحت سنجی نتایج حاصل از مدلسازی عددی، از نتایج حاصل از اندازه گیری سرعت جریان توسط سرعت سنج ADV اطراف مدل فیزیکی پایه پل در یک فلوم روباز ماریچی شامل ۵ قوس استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل آشفتگی RSM نسبت به دو مدل دیگر در مدلسازی عددی سرعت جریان و جریانهای ثانویه عملکرد بهتری داشته است. مقایسه قدرت جریانهای ثانویه در پاییندست پایه حاکی از آن بود که با قرارگیری پایه پل در میانه کانال قوسی شکل، جریانهای ثانویه به سمت قوس داخلی کانال متمرکز شده و اثر گردابه‌های برخاستگی تا مقطع ۱۵۰ درجه از قوس ادامه خواهد داشت [۱۸]. اسماعیلی و همکاران با به کارگیری مدل عددی SSIIM، آبشستگی اطراف تکپایه استوانه ای تحت هیدروگراف جریان را شبیه سازی کردند [۱۹]. جهت صحت سنجی از داده‌های آزمایشگاهی (Chang et al., 2004) استفاده گردید [۲۰]. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که با استفاده از مدل عددی SSIIM، میتوان مقادیر آبشستگی را در شاخه صعودی هیدروگراف با دقت مناسبی شبیه سازی نمود.

با توجه به پیچیدگی جریان اطراف پایه پلها و فرآیند آبشستگی، انجام آزمایش در آزمایشگاه بسیار زمانبر و هزینه‌بر است. لذا میتوان در صورت دسترسی بودن داده‌های آزمایشگاهی در شرایط مشابه و با انجام واسنجی، این کار را با هزینه و زمان کمتر با استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی موجود انجام داد و میدان جریان را به صورت عددی بررسی کرد. هدف از انجام این پژوهش، شبیه سازی الگوی جریان اطراف تکپایه، دو پایه پشت سرهم، کنارهم و زاویه دار نسبت به جهت جریان با استفاده از نرم افزار (V.16.0 Fluent) پس از واسنجی با داده‌های آزمایشگاهی است. همچنین مقایسه مقادیر سرعت در حالت شبیه سازی شده با حالت آزمایشگاهی و انتخاب بهترین حالت قرارگیری پایه‌های پل در مسیر جریان که کمترین سرعت و انرژی جنبشی آشفته اتفاق افتد. با توجه به مطالعات انجام شده مشخص می‌شود که شبیه‌سازی عددی و مقایسه الگوی جریان در اطراف پایه‌های پل که به سه صورت پشت سر هم، کنار هم و زاویه‌دار نسبت به جهت جریان قرار گرفته‌اند، توسط محققین پیشین مورد بررسی قرار نگرفته است. این در حالی است که پلهای زیادی وجود دارند که پایه‌ها به صورت مجاور هم و یا زاوی هار نسبت به راستای جریان قرار گرفته‌اند که اهمیت بررسی این موضوع را نشان می‌دهد. بنابراین در این پژوهش این موضوع مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی آزمایش ها و هندسه کانال در حالت های مختلف قرارگیری پایه ها [۱۴ و ۱۵]

Table 1. Hydraulic characteristics of the experiments and flume geometry for different pier arrangements [14, 15]

پارامتر	تک پایه	دوپایه پشت سر هم	دوپایه کنار هم	دو پایه زاویه دار
دبی (لیتر بر ثانیه)	134	134	134	134
عمق جریان (متر)	0.3	0.26	0.325	0.325
رینولدز پایه (بی بعد)	$3.2 \cdot 10^4$	$3.1 \cdot 10^4$	$3.1 \cdot 10^4$	$3.1 \cdot 10^4$
رینولدز جریان (بی بعد)	$1.06 \cdot 10^5$	$0.9 \cdot 10^5$	$0.9 \cdot 10^5$	$0.9 \cdot 10^5$
فرود جریان (بی بعد)	0.21	0.217	0.2	0.2
طول کانال (متر)	15	17	15	15
عرض کانال (متر)	1.26	1.5	1.26	1.26
قطر پایه (میلی متر)	91	91	91	91
سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)	0.354	0.346	0.33	0.33

هیدرولیکی آزمایشها شبیه به هم بود. مشخصات هیدرولیکی آزمایشها برای سه حالت تک پایه، دوپایه پشت سرهم و کنار هم در جدول ۱ ارائه شده است که مطابق با آن، Q دبی جریان (لیتر بر ثانیه)، h عمق جریان (متر)، $Re(D)$ رینولدز پایه (بی بعد)، $Re(h)$ رینولدز بر مبنای عمق جریان (بی بعد)، $Fr(h)$ عدد فرود جریان (بی بعد)، L طول کانال (متر)، b عرض کانال (متر)، D قطر پایه (در حالت گروه دو پایه قطر پایه ها برابر با حالت تک پایه است) (سانتی متر) و U_0 سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه) می باشد. همانطور که در جدول ۱ مشخص است، چون طول و عرض کانال برای هر سه حالت برابر است، بنابراین در رسم هندسه در نرم افزار نیز طول و عرض هر سه حالت یکسان و برای حالتی که دو پایه پشت سر هم قرار گرفته اند نیز مانند سه حالت دیگر در نظر گرفته شده است. برای اینکه جریان به حالت توسعه یافته برسد (بر اساس انطباق نیم رخهای سرعت طولی) و الگوی جریان به درستی در اطراف پایه ها نشان داده شود، طول کانال برای هر چهار مورد ۸ متر در نظر گرفته شد. برای حالت تکپایه طول مقطع مورد آزمایش ۲ متر است و پایه استوانه ای به حالت قائم با قطر 0.091 متر در آن محدوده قرار گرفته است. ارتفاع پایه 0.3 متر است. برای حالت دو پایه پشت سرهم طول مقطع مورد آزمایش $3/2$ متر است که دو پایه استوانه‌ای به صورت پشت سر هم و به فاصله $3D$ (قطر پایه ها و

مومنتوم.

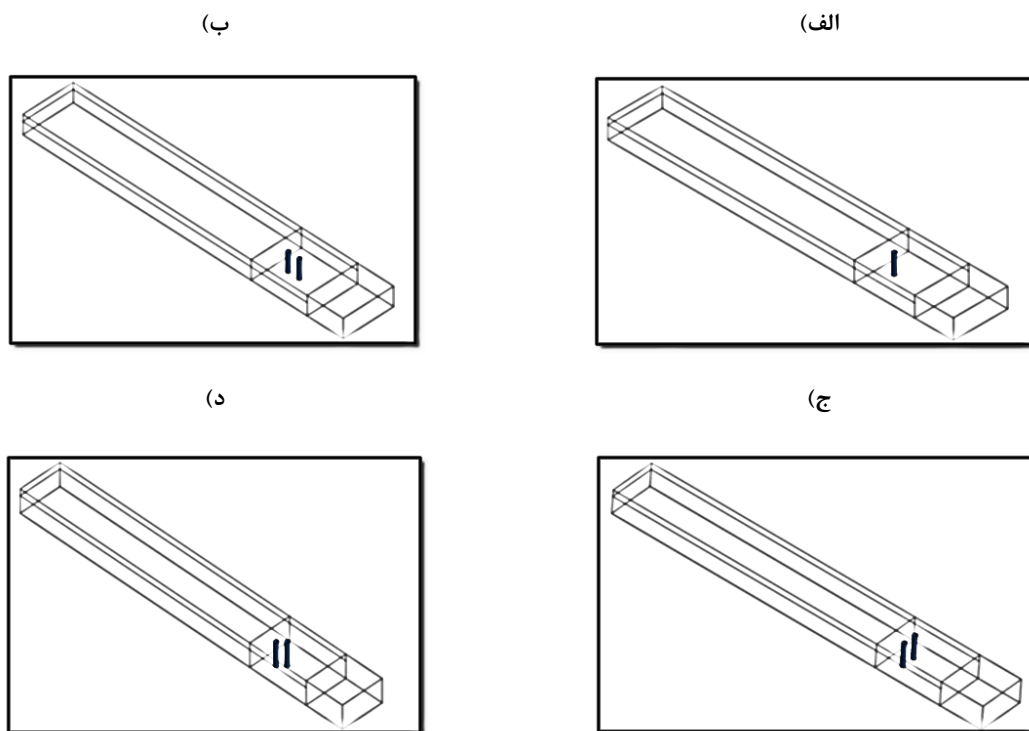
با در نظر گرفتن جریان غیر قابل تراکم و ثابت فرض کردن ضریب ویسکوزیته، شکل معادله ناور استوکس به صورت زیر است:

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho f - \nabla P + \mu \nabla^2 V \quad (1)$$

که در آن V بردار سرعت (m/s)، P بیانگر فشار (Pa)؛ ρ چگالی (نسبت جرم به حجم) سیال (kg/m^3)؛ f نیروهای حجمی (N)؛ و μ ویسکوزیته سیال (Pa.s) می باشد. d/dt بیانگر مشتق بوده و به صورت $(d\phi/dt = \partial\phi/\partial x + V \cdot \nabla\phi)$ تعریف می گردد.

۲-۳- ساخت هندسه و مش بندی کانال

جهت صحت سنجی و واسنجی نتایج تحقیق حاضر از داده های آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و اصلانی کردکندی استفاده شد [۱۴ و ۱۵]. این محققین به بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان آب در اطراف تک پایه و گروه پایه های دوتایی به صورت پشت سر هم و همچنین کنار هم در حالت بستر صاف پرداختند. برای انجام آزمایش ها از کانال موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف استفاده شده است. شرایط



شکل ۱. هندسه کانال در نرم افزار گمبیت (الف تک پایه ب) دو پایه پشت سر هم ج) دو پایه کنار هم د) دو پایه زاویه دار نسبت به جهت جریان

Fig. 1. Channel geometry in Gambit software, a) single pier b) tandem pier c) side by side pier d) inclined with the flow direction

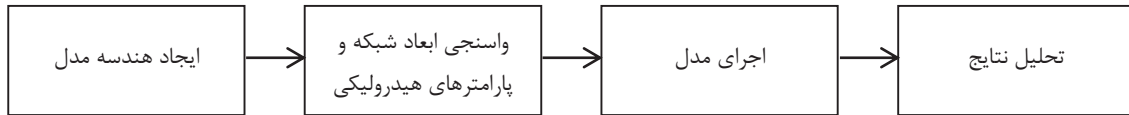
همچنین مش در اطراف پایه پل ریزتر در نظر گرفته شد. تعداد مشهای مدل تکپایه برابر ۱۳۱۸۴۸۲ و تعداد مش های سه مدل دیگر دقیقاً یکسان و برابر ۱۳۵۵۷۶۰ در نظر گرفته شد. در شکل ۱ هندسه کانال برای هر چهار مدل نشان داده شده است. همچنین در شکل ۲ مراحل مختلف اجرای مدل نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- واسنجی مدل عددی

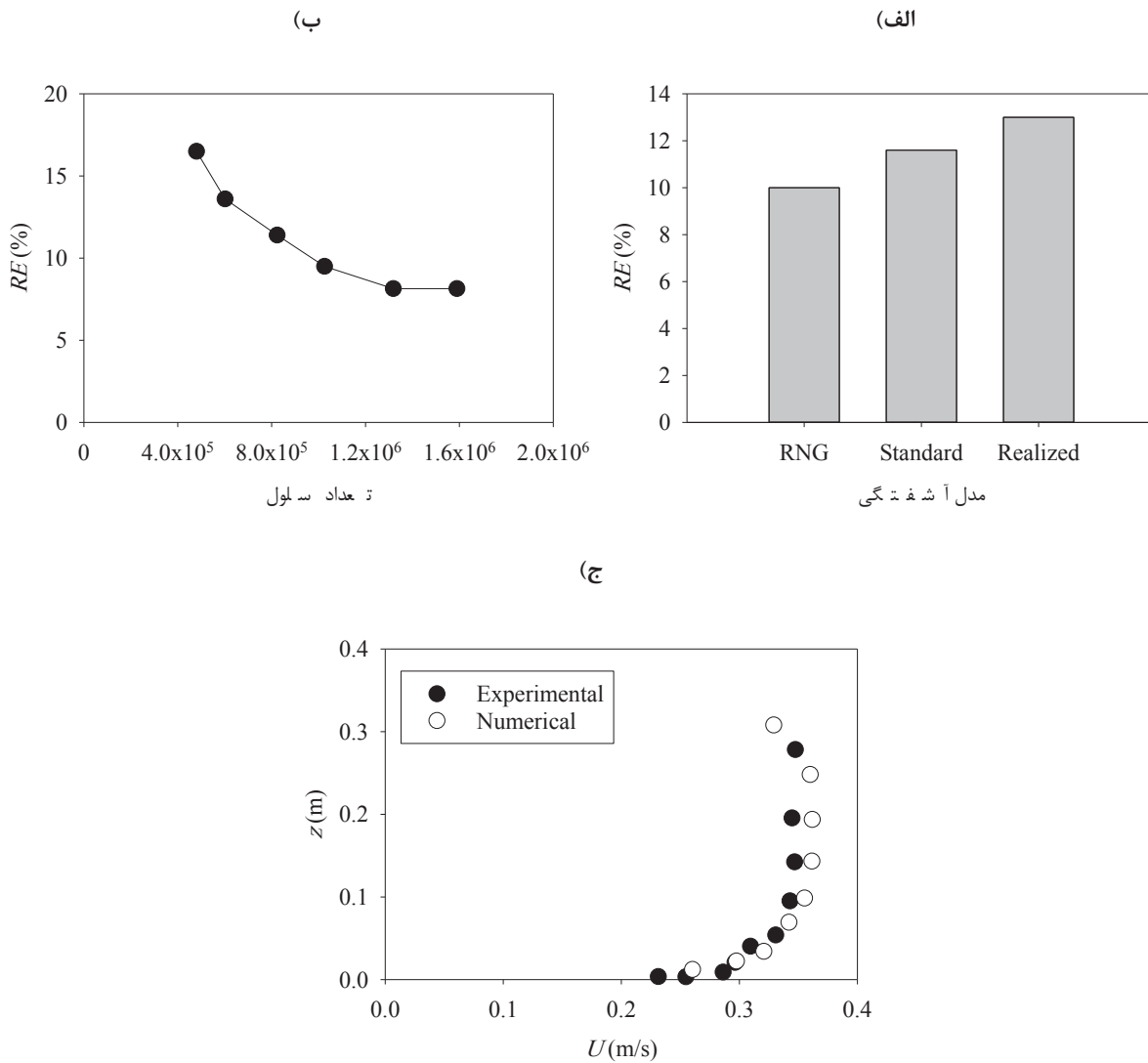
به منظور تعیین ابعاد مناسب شبکه حل در مدل عددی، شش نوع مش بندی مطابق با شکل ۳-الف با تعداد مش متفاوت در نظر گرفته شد. سپس آنالیز جریان برای هر کدام از شبکه ها به صورت جداگانه در نرم افزار فلوئنت انجام و در نهایت نتایج حاصل از فلوئنت با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش تعداد مش، درصد خطا کم می شود تا جاییکه افزایش تعداد مش تأثیری بر روی خطا نمی گذارد و مقدار خطا ثابت می شود. با توجه به شکل ۳-الف، چون شبکه شماره ۵ با تعداد سلول کمتر در زمان کمتری به همگرایی رسیده است،

برابر با ۰/۰۹۱ متر است) به حالت قائم قرار گرفته اند. ارتفاع پایه ها در این حالت ۰/۲۶ متر است. برای حالت دو پایه کنار هم طول مقطع مورد آزمایش ۲ متر است که دو پایه استوانه‌ای کنار هم، به فاصله ۳D به حالت قائم قرار گرفته اند. ارتفاع پایه ها در این حالت برابر ۰/۳۲۵ متر است. در حالت دو پایه که زاویه دار نسبت به جهت جریان قرار گرفته اند طول مقطع مورد آزمایش ۲ متر است که دو پایه استوانه‌ای با زاویه ۴۵ درجه نسبت به هم و به فاصله ۳D به حالت قائم قرار گرفته اند. ارتفاع پایه ها در این حالت برابر ۰/۳۲۵ متر است. همانطور که در شکل ۱ مشخص است، کل کانال به سه حجم تقسیم شده است. حجم اول، قسمت ورودی (حجم سمت چپ)، حجم دوم، قسمتی که پایهها در آن قرار گرفته اند و حجم سوم به عنوان حجم خروجی است. مش بندی کانال با استفاده از نرم‌افزار گمبیت (V.۲.۴.۶) انجام شد. برای حجمهای اول و سوم از مشبندی سازمان یافته و برای حجم دوم از مشبندی غیر سازمان یافته استفاده شد. به منظور افزایش دقت در شبیه سازی جریان در نزدیکی جدار، کف کانال دارای مش ریزتر و سپس مش بندی درشت تر و در سطح آب نیز مجدداً مش بندی ریزتر شد. این کار برای شبیه‌سازی بهتر و دقیقتر تغییرات در نواحی نزدیک مرز صورت گرفت.



شکل ۲. فلوچارت اجرای مدل

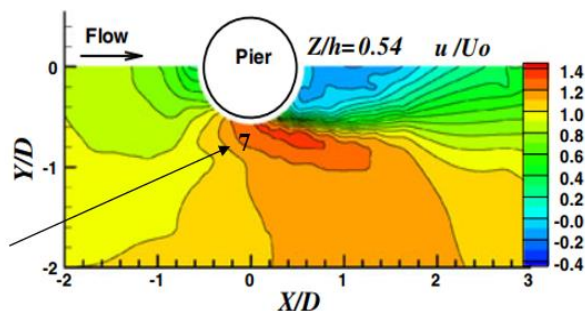
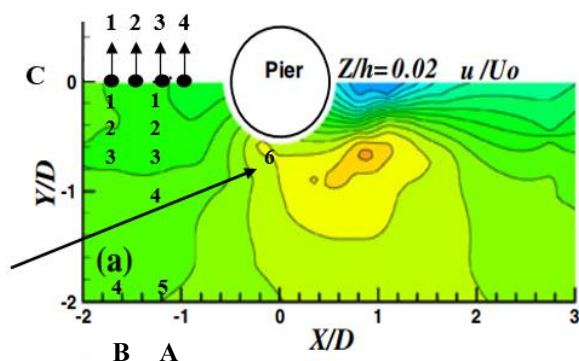
Fig. 2. Model flowchart



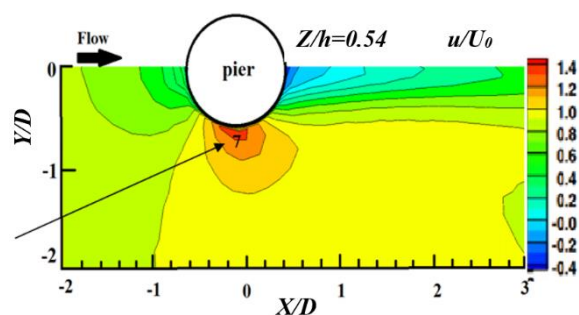
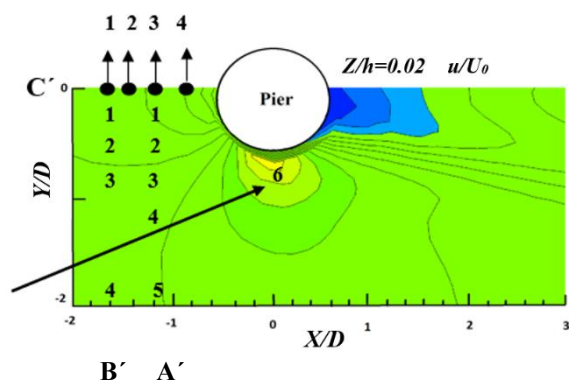
شکل ۳: الف) خطای نسبی مدل های آشفتگی مختلف ب) تاثیر اندازه سلول بر دقت مدل عددی، و ج) مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی

Fig. 3. a) relative error of different turbulence models b) the effect of cell size on the accuracy of the numerical model, and c) comparison of the results of the numerical and experimental model

(الف)



(ب)



شکل ۴. خطوط هم‌تراز سرعت در جهت طولی (x) مدل آزمایشگاهی، (ب) نتیجه شبیه‌سازی

Fig. 4. velocity contours in the x direction a) experimental, and b) simulated result

۳-۲- مقایسه نتایج سرعت در حالت تک‌پایه

در این قسمت بردارهای سرعت در راستای جریان برای مدل تک‌پایه شبیه‌سازی و نتایج به دست آمده با مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. این مقایسه‌ها در دو عمق $0.2h$ و $0.54h$ انجام گرفت. شکل ۴ خطوط هم‌تراز سرعت در جهت X (جهت جریان) را برای هر دو مدل آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد. سرعت برای هر دو مدل، هماهنگی خوبی با هم دارند به طوری که حداکثر سرعت $1/4 U_0$ و حداقل سرعت $-0.4 U_0$ است. نتایج شبیه‌سازی تطابق خوبی را از نظر اندازه سرعت و مقدار آن در اطراف تک‌پایه نشان می‌دهد. در اطراف پایه به دلیل فشردگی جریان، سرعت جریان افزایش پیدا می‌کند که این افزایش به خوبی در نتایج شبیه‌سازی شده مشهود است. بزرگی این سرعت در عمق $0.2h$ نسبت به عمق $0.54h$ کمتر بوده، چرا که هر چه جریان از بستر به سمت سطح آب حرکت کند، سرعت آن افزایش می‌یابد، که این تفاوت به خوبی در شکل نشان داده شده است. همچنین به دلیل تشکیل گردابه‌های برخاستگی در ناحیه

پس S_5 شبکه مورد نظر برای فراخوانی به نرم افزار فلوئنت می‌باشد و ادامه محاسبات با این شبکه صورت گرفته است. همچنین مطابق شکل ۳-ب با بررسی سه مدل آشفتگی، مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG که کمترین خطا را به دست می‌دهد به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب شد. پس از تعیین مدل آشفتگی مناسب و اندازه بهینه شبکه، مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی در حالت تک‌پایه انجام گرفت که در شکل ۳-ج آورده شده است که نشان دهنده دقت مناسب مدل عددی استفاده شده در تحقیق حاضر است. خطای نسبی (RE) از رابطه (۲) محاسبه شده است.

$$RE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - P_i}{P_i} \right)^2} \quad (2)$$

که در این رابطه P_i مقدار آزمایشگاهی و O_i مقدار شبیه‌سازی شده و RE میانگین خطای نسبی است.

جدول ۲. مقایسه سرعت در راستای x در فاصله ۷ میلی متری از بستر در مقطع عرضی A-A'

Table 2. Comparison of the velocity in the x direction at a distance of 7 mm from the bed in A-A' cross-section

نقاط	طول (متر)	ارتفاع (متر)	عرض (متر)	سرعت اندازه گیری شده (متر بر ثانیه)	سرعت محاسبه شده (متر بر ثانیه)	خطا (درصد)
۱	-۰/۱۵	-۰/۰۱۹۴۲	۰	۰/۲۴۷۳۹	۰/۲۴۲۴۹	۱/۹۸۱
۲	-۰/۱۵	-۰/۰۴۹۳۷	۰	۰/۲۹۵۰۷	۰/۳۰۱۸۲	۲/۲۸۸
۳	-۰/۱۵	-۰/۰۶۷۱۷	۰	۰/۳۰۴۲۳	۰/۳۲۰۶۷	۵/۴۰۳
۴	-۰/۱۵	-۰/۰۱۰۶۲	۰	۰/۳۱۱۵	۰/۳۴۷۸۷	۱۱/۸۰۱
۵	-۰/۱۵	-۰/۰۱۷۴	۰	۰/۳۰۴۱۷	۰/۳۴۵۱۵	۱۳/۴۷۱

جدول ۳. مقایسه سرعت در راستای x در فاصله ۷ میلی متری از بستر در مقطع عرضی B-B'

Table 3. Comparison of the velocity in the x direction at a distance of 7 mm from the bed in B-B' cross-section

نقاط	طول (متر)	ارتفاع (متر)	عرض (متر)	سرعت اندازه گیری شده (متر بر ثانیه)	سرعت محاسبه شده (متر بر ثانیه)	خطا (درصد)
۱	-۰/۱	-۰/۰۱۹۷۳	۰	۰/۲۲۸۱۴	۰/۲۱۱۱۲	۷/۴۲
۲	-۰/۱	-۰/۰۴۸۸۸	۰	۰/۲۶۵۳۶	۰/۲۷۱۰۲	۲/۱۳
۳	-۰/۱	-۰/۰۶۶۶۴	۰	۰/۲۷۲۹۱	۰/۲۸۷۷۵	۵/۴۴
۴	-۰/۱	-۰/۰۱۷۴	۰	۰/۲۶۶۱۷	۰/۳۰۳۹	۱۴/۱۸

۳-۳- مقایسه نتایج سرعت در حالت دو پایه پشت سر هم

در این قسمت نتایج حاصل از شبیه‌سازی سرعت در جهت X در دو سطح ۷ و ۱۴۰ میلی‌متری از بستر جریان در حالت دو پایه پشت سر هم ارائه و با مدل آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، سرعت در مدل شبیه‌سازی شده مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد، به طوری که حداکثر مقدار در هر دو مدل $U_0/4$ و مقدار حداقل $U_0/4$ می‌باشد. مؤلفه طولی سرعت جریان با رسیدن به پایه اول پیرامون آن افزایش می‌یابد. افزایش سرعت در این ناحیه و امتداد آن به سمت پایین دست ناشی از تنگ شدگی جریان به علت قرار گرفتن پایه و ناحیه چرخشی گردابه‌های برخاستگی در پایین دست است. در بین پایه‌ها به دلیل تشکیل گردابه‌ها و جریان‌های پایین رونده، سرعت جریان منفی

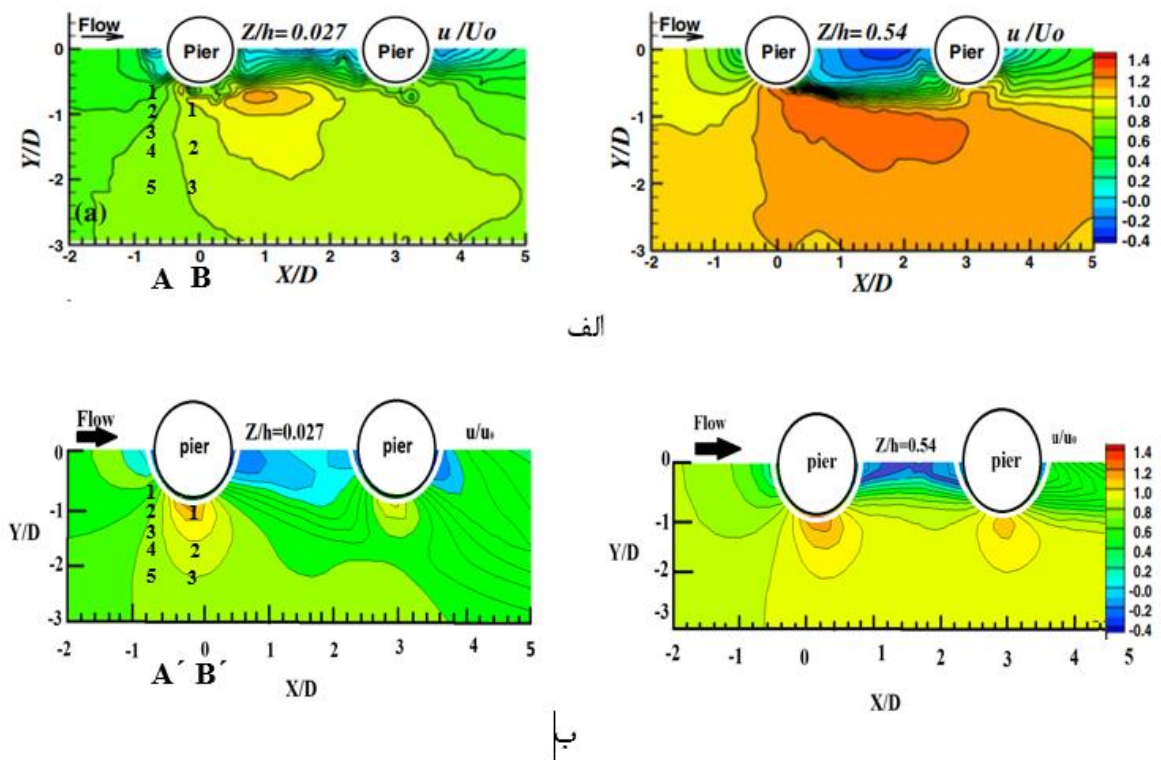
پشت پایه، سرعت منفی در دو عمق مختلف از جریان مشاهده می‌گردد. در هر دو مدل آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده در ارتفاع ۷ میلی‌متری از بستر مقدار عددی سرعت در راستای X در سه مقطع عرضی مختلف به دست آمده که در جدول ۲ نشان داده شده است.

در شکل های ۴ (الف و ب) سه مقطع عرضی، A, A', B, C, C' برای مقایسه اختلاف سرعت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده ایجاد شده است و نتایج این مقایسه در جدولهای ۲-۴ ارائه شده است. مقدار خطای میانگین به دست آمده از مقایسه مقادیر سرعت در راستای X بین داده های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده طبق رابطه زیر در مقطع عرضی AA' برابر با ۷، در مقطع عرضی BB' برابر ۷/۳ و در مقطع عرضی CC' برابر ۳/۱۲۵ درصد است که از رابطه ۲ محاسبه شده است. همچنین میانگین خطا در نقاط ۶ و ۷ در محل برخورد به پایه پل به ترتیب برابر با ۲ و ۱/۵ درصد است.

جدول ۴. مقایسه سرعت در راستای x در فاصله ۷ میلی متری از بستر در مقطع عرضی C-C'

Table 4. Comparison of the velocity in the x direction at a distance of 7 mm from the bed in C-C' cross-section

نقاط	طول (متر)	ارتفاع (متر)	عرض (متر)	سرعت اندازه گیری شده (متر بر ثانیه)	سرعت محاسبه شده (متر بر ثانیه)	خطا (درصد)
۱	-۰/۱۵	۰	۰/۰۴۹۳۷	۰/۲۹۵۰۷	۰/۳۰۱۸۲	۲/۲
۲	-۰/۱۲	۰	۰/۰۴۹۳۷	۰/۲۸۵۷۹	۰/۲۸۸۰۲	۰/۸
۳	-۰/۰۹	۰	۰/۰۴۹۳۷	۰/۲۴۸۴	۰/۲۶۰۸۹	۴/۸
۴	-۰/۰۸۲	۰	۰/۰۴۹۳۷	۰/۲۳۲۵۳	۰/۲۴۶۷۶	۴/۷



شکل ۵. خطوط هم‌تراز سرعت در جهت x (الف) مدل آزمایشگاهی (ب) نتیجه شبیه‌سازی

Fig. 5. velocity contours in the x direction a) experimental b) simulated results

جدول ۵. مقایسه سرعت در راستای x در مقطع عرضی A-A

Table 5. Comparison of the velocity in the x direction in A-A' cross-section

نقاط	طول (متر)	ارتفاع (متر)	عرض (متر)	سرعت اندازه گیری شده (متر بر ثانیه)	سرعت محاسبه شده (متر بر ثانیه)	خطا (درصد)
۱	-۰/۰۴۷	-۰/۰۶	۰/۰۴۹	۰/۳۳۹	۰/۳۵۲	۳/۷
۲	-۰/۰۴۷	-۰/۰۹	۰/۰۴۹	۰/۳۵۱	۰/۳۶۲	۳
۳	-۰/۰۴۷	-۰/۱۲	۰/۰۴۹	۰/۳۳۹	۰/۳۵۹	۵/۶
۴	-۰/۰۴۷	-۰/۱۵	۰/۰۴۹	۰/۳۴۰	۰/۳۵۴	۴
۵	-۰/۰۴۷	-۰/۲	۰/۰۴۹	۰/۳۴۶	۰/۳۵۱	۱/۴

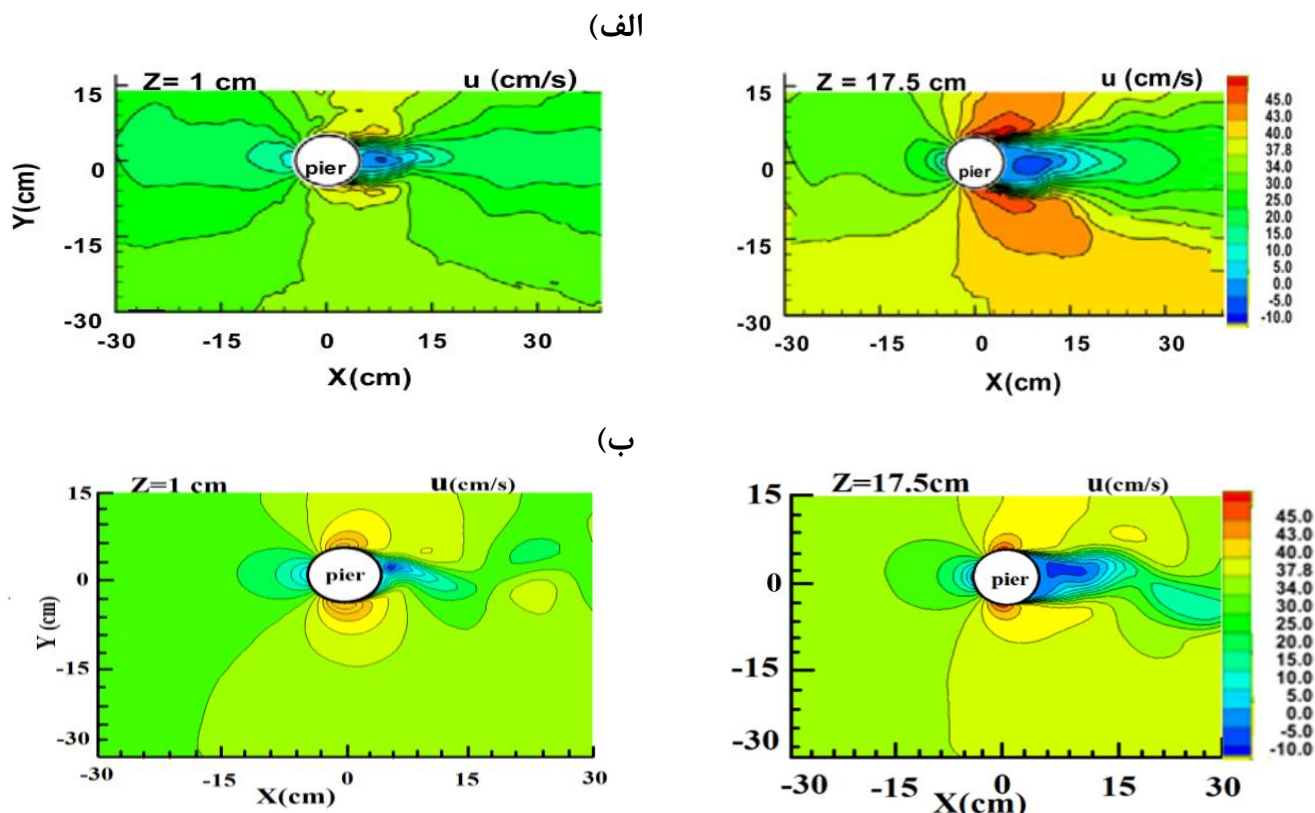
جدول ۶. مقایسه سرعت در راستای x در مقطع عرضی B-B'

Table 6. Comparison of the velocity in the x direction in two B-B' cross-section

نقاط	طول (متر)	ارتفاع (متر)	عرض (متر)	سرعت اندازه گیری شده (متر بر ثانیه)	سرعت محاسبه شده (متر بر ثانیه)	خطا (درصد)
۱	۰	-۰/۰۹	۰/۰۴۹	۰/۴	۰/۴۱	۲/۴
۲	۰	-۰/۱۵	۰/۰۴۹	۰/۳۵۸	۰/۳۶۵	۱/۹
۳	۰	-۰/۲	۰/۰۴۹	۰/۳۵۶	۰/۳۵۵	۰/۳

۳-۴- مقایسه خطوط هم‌تراز سرعت در مدل دو پایه کنار هم شکل ۶ کانتورهای سرعت در جهت X در دو سطح ۱ و ۱۷۵ میلی‌متری از بستر برای هر دو مدل آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است با برخورد آب به پایه‌ها سرعت در بین دو پایه افزایش پیدا کرده است. سرعت برای هر دو مدل هماهنگی خوبی با هم دارند، به طوری که مقدار حداکثر و حداقل سرعت به ترتیب ۰/۴۵ متر بر ثانیه و ۰/۱- متر بر ثانیه است. مقدار سرعت در سطح ۱۷۵ میلی‌متری از بستر نسبت به سطح ۱ میلی‌متری بیشتر است. در پشت پایه‌ها به دلیل تشکیل گردابه‌های چرخشی و ناحیه جریان برگشتی، جریان در خلاف جهت Y منحرف می‌شود و سرعت آن منفی می‌شود؛ که این روند

می‌شود. در سطح ۱۴۰ میلی‌متری از بستر، این افزایش سرعت بیشتر از سطح ۷ میلی‌متری است. دلیل آن هم این است که با فاصله گرفتن از بستر کانال، سرعت جریان افزایش می‌یابد. در کنار پایه دوم در مدل شبیه‌سازی، تا حدودی افزایش سرعت دیده می‌شود که در مدل آزمایشگاهی این افزایش وجود ندارد. در شکل‌های ۵، الف و ب دو مقطع عرضی فرضی A, A', B, B' برای مقایسه اختلاف سرعت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده ایجاد شده است و نتایج این مقایسه در جدول‌های ۵ و ۶ زیر ارائه شده است. مقدار خطای میانگین به دست آمده از مقایسه مقادیر سرعت در راستای X بین داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده در مقطع عرضی A برابر ۳/۵۴ و در مقطع عرضی B, B' برابر با ۱/۵۳ درصد است.



شکل ۶. خطوط هم‌تراز سرعت در راستای x (الف) مدل آزمایشگاهی و (ب) نتیجه شبیه‌سازی شده

Fig. 6. velocity contours in the x direction a) experimental, and b) simulated results

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی جریان اطراف تک‌پایه و گروه پایه‌های پل پشت سر هم، کنار هم و زاویه‌دار نسبت به جهت جریان به کمک مدل عددی فلونت پراخته شد. برای مدل کردن جریان در نرم‌افزار فلونت از مدل تلاطمی k-ε RNG استفاده شد. این بررسی‌ها شامل خطوط هم‌تراز سرعت در سه جهت X، Y و Z خطوط جریان و خطوط هم‌تراز سرعت برای هر دو حالت تک‌پایه و گروه پایه و نتایج تک‌پایه و دو پایه پشت سر هم با نتایج آزمایشگاهی عطایی آشتیانی و اصلانی کردکندی مقایسه گردید. تمام این بررسی‌ها در حالت دو فازی صورت گرفت. در ادامه به نتایج حاصل از این پژوهش به طور خلاصه اشاره می‌شود.

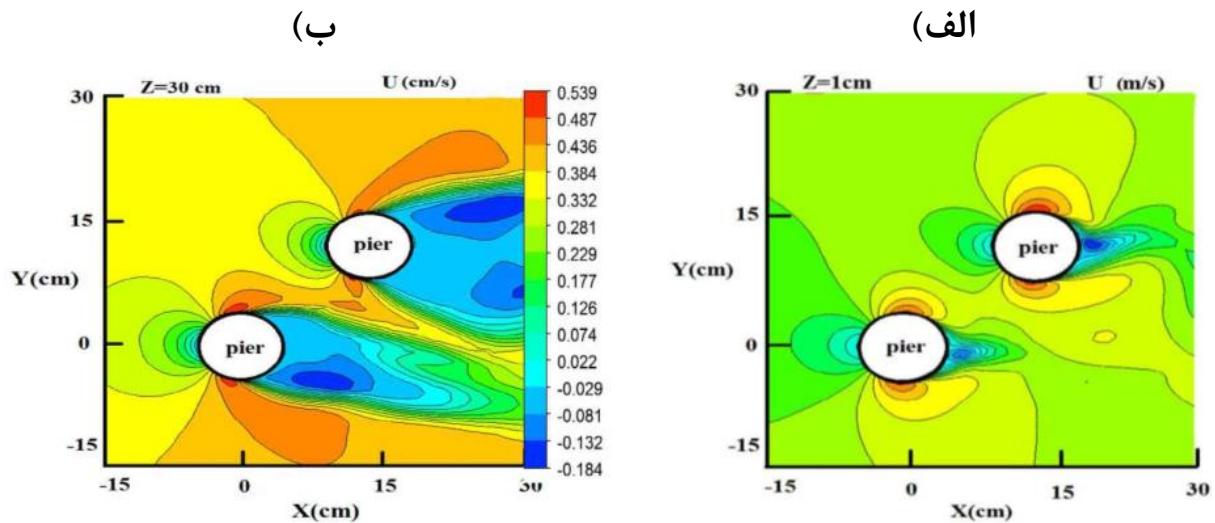
– نرم‌افزار Fluent قابلیت مناسبی در شبیه‌سازی جریان در اطراف تک‌پایه و گروه پایه پل را دارد.

– سرعت در راستای X برای مدل دو پایه پشت سر هم مقدار ۲/۳۴٪ نسبت به تک‌پایه کاهش داشته است. برای مدل دو پایه کنار هم مقدار

برای هر دو مدل آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده به خوبی دیده می‌شود. لازم به ذکر است به دلیل تقارن جریان اطراف پایه‌ها و به منظور تبیین بهتر تغییرات، فقط یکی از پایه‌ها نشان داده شده است.

۳-۵ خطوط هم‌تراز سرعت در حالت دو پایه که زاویه‌دار نسبت به جهت جریان قرار گرفته‌اند

شکل ۷ کانتورهای سرعت در راستای X را در دو سطح ۱۰ و ۳۰۰ میلی‌متری از بستر نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود سرعت در کناره‌های پایه پل به بیشترین مقدار خود یعنی ۰/۰۵۴ متر بر ثانیه می‌رسد. این افزایش سرعت و امتداد آن برای سطح ۳۰۰ میلی‌متری از بستر بیشتر از سطح ۱۰۰ میلی‌متری است. چون در نزدیکی بستر، زبری بستر و خود پایه بر روی سرعت جریان تأثیر می‌گذارد اما در نزدیکی سطح آب فقط زبری پایه جلوی سرعت جریان را می‌گیرد. در پشت پایه‌ها به دلیل ایجاد گردابه‌های چرخشی، سرعت منفی ایجاد می‌شود.



شکل ۷. خطوط هم‌تراز سرعت در راستای x، الف) $z=1\text{cm}$ و ب) $z=30\text{cm}$

Fig. 7. velocity contours in the x direction a) $z=1\text{cm}$, and b) $z=30\text{cm}$

Scour Eros. (ICSE-3). Novemb. 1-3, 2006, Amsterdam, Netherlands, 2006: pp. 434–436.

- [3] A. Parsaie, S. Dehdar-Behbahani, A.H. Haghiabi, Numerical modeling of cavitation on spillway's flip bucket, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 10 (2016) 438–444.
- [4] S. Dehdar-Behbahani, A. Parsaie, Numerical modeling of flow pattern in dam spillway's guide wall Case study: Balaroud dam, Iran, *Alexandria Engineering Journal*, 55 (2016) 467–473.
- [5] A. Keshavarzi, C.K. Shrestha, M.R. Zahedani, J. Ball, H. Khabbaz, Experimental study of flow structure around two in-line bridge piers, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 171 (2018) 311–327.
- [6] M. Osrush, S.A. Hosseini, A.A. Kamanbedast, Evaluation and comparison of the slots and collars performance in reducing scouring around bridge abutments, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (2019) (In Persian) .

۲۷/۹٪ نسبت به تک‌پایه کاهش و برای مدل زاویه‌دار ۸۷/۸٪ افزایش داشته است. پس بیشترین مقدار سرعت بین تک‌پایه و گروه پایه پل، مربوط به مدل زاویه‌دار می باشد.

- در مدل دو پایه، بیشترین مقدار سرعت در راستای X، مربوط به مدل دو پایه با زاویه با مقدار ۵۴/۰ متر بر ثانیه و کمترین آن برای مدل دو پایه کنار هم با مقدار ۴۵/۰ متر بر ثانیه به دست آمد.

- مقدار خطای میانگین به دست آمده از مقایسه مقادیر سرعت در راستای X بین داده های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده در سه مقطع عرضی فرضی برای مدل تک‌پایه برابر با ۷/۳ درصد و برای دو مقطع عرضی مدل دو پایه پشت سر هم برابر با ۳/۱۲۵ درصد است.

منابع

- [1] A.R. Zarrati, M.R. Chamani, A. Shafaie, M. Latifi, Scour countermeasures for cylindrical piers using riprap and combination of collar and riprap, *International Journal of Sediment Research*, 25 (2010) 313–322.
- [2] M.B. Mashahir, A.R. Zarrati, E. Mokallaf, Depth of Scour at Groups of Two Bridge Piers, in: *Proc. 3rd Int. Conf.*

- dimensional rans modeling of flow around circular piers using nested grids, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 6 (2012) 648–662.
- [15] B. Ataie-Ashtiani, A. Aslani-Kordkandi, Flow field around single and tandem piers, *Flow, Turbulence and Combustion*, 90 (2013) 471–490.
- [16] M. Hashemi, M.A. Zomorodian, M.M. Alishahi, Simulation of Turbulent Flow Around Tandem Piers, *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 43 (2019) 761–768.
- [17] N. Kardan, N. Hassanpour, A.H. Hoseinzade-Dalir, Experimental and Numerical Investigation of Bed Erosion around Bridge Piers with Different Cross-Sections, *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 19 (2018) 19–36 (In Persian) .
- [18] D.A. Hooshmand, K. Esmaili, D.A. Keshavarzi, A.R. Faridhoseni, Numerical Modeling of Flow around Bridge Piers in Meandering Channel, *Journal of Water and Soil*, 27 (2011) 973–984 (In Persian) .
- [19] T. Esmaili, S. Kharaghani, A. Dehghani, 3d Numerical Study on Scouring Around Bridge Piers Under Unsteady Flow Condition, *Journal of Water Science Research*, 1 (2008) 19–28 (In Persian) .
- [20] W.-Y. Chang, J.-S. Lai, C.-L. Yen, Evolution of Scour Depth at Circular Bridge Piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 130 (2004) 905–913.
- [21] R. Valizadeh, A. Arman, 3D Numerical Simulation of Shear Stress in Rectangular Compound Channel using Ansys Fluent Model, *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 20 (2019) 77–94 (In Persian) .
- [7] A. Yazdani, K. Hoseini, H. Karami, Investigation of Scouring of Rectangular Abutment in a Compound Channel Under Unsteady Flow (Experimental Study), *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (2019) (In Persian) .
- [8] Z. Taheri, M. Ghomeshi, Experimental study of the effect of netted collar position on scour depth around of oblong-shappe bridge pier, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51 (2019) 81–82 (In Persian) .
- [9] T.M. Salaheldin, J. Imran, M.H. Chaudhry, Numerical Modeling of Three-Dimensional Flow Field Around Circular Piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 130 (2004) 91–100.
- [10] M.H. Besharati, H. Hakimzadeh, 3d numerical investigation of flow pattern and bed shear stress around conical piers, *Journal of Marine Engineering*, 6 (2010) 63–70.
- [11] M. Poorahmadi, H. Hakimzadeh, Investigation of flow pattern around cylindrical pier under steady flow using first and second order turbulence models, in: *Proc. 5th Natl. Congr. Civ. Eng.*, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 2010 (In Persian) .
- [12] A.K. Barbhuiya, S. Dey, Measurement of turbulent flow field at a vertical semicircular cylinder attached to the sidewall of a rectangular channel, *Flow Measurement and Instrumentation*, 15 (2004) 87–96.
- [13] S.T. Naini, M. Fazli, Investigation of Effect of Bridge Pier Shape on Dynamic Forces, *Journal of Civil and Surveying Engineering*, 5 (2010) 741–751 (In Persian) .
- [14] S. Baranya, N.R.B. Olsen, T. Stoesser, T. Sturm, Three-

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Z. Behrouzi, H. Hamidifar, S. M. A. Zomorodian, Numerical simulation of flow velocity around single and twin bridge piers with different arrangements using the Fluent model, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(9) (2021) 3883-3896.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18136.6777



