

توسعه مدل عددی سه بعدی جریان با کارایی بالا برای شبیه سازی جریان اطراف پایه و کوله پل

مقاله علمی - پژوهشی

فواد کیلانه‌ئی*، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
امیر محجوب، استادیار، پژوهشکده حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
سید تقی امید نائینی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
مسعود منتظری نمین، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: kilanehei@eng.ikiu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰

صفحه ۲۰-۱

چکیده

در این مقاله یک مدل عددی سه بعدی با کارایی بالا برای شبیه سازی جریان اطراف کوله و پایه پل توسعه داده شده است. از آنجایی که تمرکز مدل توسعه داده شده برای مدلسازی جریان در اطراف پل‌های رودخانه‌ای است، بنابراین در کلیه بخشهای مختلف مدل توسعه داده شده، کاهش هزینه محاسبات با حفظ دقت مورد نیاز مد نظر قرار گرفته است. مدل سه بعدی از روش حجم محدود و گام کسری بر روی یک شبکه بدون ساختار مثلثی در پلان و با ساختار در صفحه قائم برای حل معادلات حاکم استفاده می‌کند. در مدل عددی، معادله انتقال در صفحه افقی با استفاده از روش صریح و در صفحه قائم با استفاده از روش ضمنی حل شده‌اند. مدل‌سازی آشفته‌گی بر اساس مدل مختلط، اسماکورینسکی در پلان و یک بعدی $k-\epsilon$ در جهت قائم، انجام گرفته است. برای در نظر گرفتن تراز سطح آزاد آب در مدل عددی، صرفاً فشار لایه آخر با فرض فشار هیدرواستاتیک تعیین شده است. برای ارزیابی مدل، توسعه لایه مرزی سه بعدی در کانال روباز مورد آزمون قرار گرفته است. مقایسه نتایج حاصله از مدل‌سازی جریان اطراف یک پایه پل و کوله پل با نتایج آزمایشگاهی، بیاتگر دقت مناسب و کارایی بالای مدل سه بعدی توسعه داده شده است.

واژه‌های کلیدی: مدلسازی سه بعدی جریان، روش حجم محدود، روش گام کسری، شبکه بدون ساختار مثلثی، پل‌های رودخانه‌ای

۱- مقدمه

تعیین ساختار جریان اطراف پایه‌ها و کوله‌های آن از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است (هادیان و زراتی ۱۳۸۸). به طور معمول و بنا به دلایل اقتصادی با ساخت پلها، مقطع عرضی رودخانه به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد و الگوی جریان را به طور محسوسی تحت تأثیر قرار می‌دهند. خطوط جریان با نزدیک شدن به کوله و پایه پلها، آرایش خود را تغییر داده و به تبعیت از ساختار هندسی، نوع سازه و سایر مشخصات فنی مربوط، الگوهای متفاوتی از جریان را به خود می‌گیرند. با توجه

پایه پل‌ها، کوله پل‌ها، آبشکن‌ها و دیوارهای هدایت جریان از جمله سازه‌های هیدرولیکی می‌باشند که به طور معمول در رودخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. با قرار گرفتن این سازه‌ها در مسیر جریانهای رودخانه‌ای، تغییراتی در الگوی جریان به وجود می‌آید که عموماً باعث افزایش ظرفیت انتقال رسوب و آبستگی در اطراف آنها می‌شود. تخریب اکثر پلهای رودخانه‌ای عمدتاً به دلیل در نظر نگرفتن نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی آنها است. بنابراین در طراحی پل‌ها،

توسط این محققین برای بررسی در نظر گرفته شدند. آنها میدان جریان و تنش برشی کف محاسبه شده از نرم افزار را با داده‌های آزمایشگاهی احمد و راجاراتنام (۱۹۹۸) و درگاهی (۱۹۸۷) مقایسه کردند. کیو و ژانگ (۲۰۰۵) مدلی سه بعدی برای شبیه‌سازی جریان آشفتنه و رسوب در اطراف آبشکن‌ها ارائه کردند. در این مدل علاوه بر مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و تابع دیوار، روش VOF برای شبیه‌سازی سطح آزاد آب مورد استفاده قرار گرفته است. زولین و همکاران (۲۰۰۶) شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ را برای مدل‌سازی سه بعدی جریان اطراف آبشکن‌های غیر مستغرق به کار بردند. این محققین از روش حجم محدود برای منقطع سازی معادلات ناویراستوکس بر روی شبکه جابجا شده استفاده کردند و الگوریتم سیمپل سی را برای حل آن به کار بردند. آقای شلمانی و حکیم‌زاده (۱۳۸۷) مدلی سه بعدی را جهت شبیه‌سازی جریان اطراف پایه‌های پل توسعه دادند. آنها معادلات ناویراستوکس متوسط‌گیری شده رینولدز را با فرض توزیع فشار هیدرواستاتیک در عمق، بر روی شبکه با ساختار و با استفاده از روش حجم محدود حل نمودند. این پژوهشگران مدل آشفتگی پراندتل را برای شبیه‌سازی تنش‌های رینولدز مورد استفاده قرار دادند و روش گام به گام صریح را برای حل معادلات منقطع شده به کار بردند. نتایج مدل‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی درگاهی (۱۹۸۹) مقایسه شده است. مک‌کوی و همکاران (۲۰۰۸) جریان اطراف میدان آبشکن‌های غیر مستغرق واقع در یک کانال مستقیم را با استفاده از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به صورت سه بعدی مدل‌سازی کردند. این محققین روش حجم محدود و گام جزئی را برای منقطع‌سازی معادلات ناویراستوکس بر روی شبکه بدون ساختار ترکیبی به کار بردند. یزدی و همکاران (۲۰۱۰) الگوی جریان اطراف آبشکن را با استفاده از نرم افزار FLUENT به صورت سه بعدی مورد بررسی قرار دادند. ایشان از مدل آشفتگی $k-\omega$ و روش VOF برای مدل‌سازی آشفتگی و سطح آزاد آب استفاده کردند. محجوب و کیلانته‌ئی (۲۰۲۰) با کاربرد یک مدل سه بعدی، اثرات زاویه بیه و طول خاکریز دسترسی جاده بر عملکرد هیدرولیکی پلهای واقع در کانالهای مرکب را مورد بررسی قرار دادند. صفائی و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از تحلیل عددی سه‌بعدی به بررسی تنش برشی بستر و اختلاف مومتوم بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی در یک کانال مرکب دوزنقه‌ای متقارن با استفاده از نرم افزار FLOW-3D پرداختند.

به اهمیت شناخت الگوی جریان در دقت تخمین آبشستگی اطراف سازه‌ها، مطالعات عددی متعددی بصورت دو بعدی در پلان و سه بعدی در این زمینه انجام شده است. از آنجایی که از نظر هیدرولیکی، وضعیت جریان در اطراف کوله‌های پل بسیار شبیه به جریان در اطراف آبشکن‌ها است، بنابراین در این قسمت، مرور ادبیات فنی در خصوص آبشکن‌ها نیز انجام شده است. مولیناس و حافظ (۲۰۰۰) یک مدل دو بعدی المان محدود را برای شبیه‌سازی جریان اطراف کوله‌های قائم توسعه دادند. آنها اثرات نسبت پیش‌آمدگی، زبری بستر، عمق جریان، شدت جریان و شیب انرژی را در میدان جریان مورد بررسی قرار دادند. نائینی و فضل‌لی (۱۳۹۰) شبیه‌سازی جریان اطراف شکل‌های مختلف پایه پل را با استفاده از نرم‌افزار FLUENT و در حالت دو بعدی انجام و میزان اثرگذاری شکل پایه بر روی الگوی شکل‌گیری جریان، بزرگی گردابه‌ها و پارامترهای شکست گردابه از جمله ضریب درگ و ضریب لیفت را در دو حالت اصابت مستقیم و اصابت مایل جریان مورد بررسی قرار دادند. اولسن و ملابین (۱۹۹۳) جریان یکنواخت و آبشستگی موضعی اطراف پایه استوانه‌ای شکل را با استفاده از مدلی عددی شبیه‌سازی نمودند. مدل عددی توسعه داده شده، معادلات سه بعدی ناویراستوکس را با استفاده از روش حجم محدود بر روی شبکه بدون ساختار غیر متعامد حل می‌نمود. آنها برای محاسبه عبارات تنش‌های رینولدز از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استفاده نمودند. اوپلن و دارتوس (۱۹۹۷) یک مدل سه بعدی را برای بررسی جریان در اطراف آبشکن، توسعه داده و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. کیمورا و هوسودا (۲۰۰۳) مدلی سه بعدی جهت شبیه‌سازی جریان اطراف موانع موجود در جریان را توسعه دادند. این محققین از مدل $k-\epsilon$ غیر خطی برای مدل‌سازی آشفتگی استفاده کردند. آنها معادلات حاکم را با استفاده از روش حجم محدود بر روی یک شبکه با ساختار جابجا شده منقطع نمودند و از روش کوئیک برای حل ترم‌های انتقال و روش تفاضل مرکزی برای ترمهای پخش استفاده کردند. توانایی چند مدل آشفتگی برای شبیه‌سازی جریان جدا شونده اطراف پایه‌های استوانه‌ای شکل با استفاده از نرم‌افزار FLUENT و به صورت سه بعدی توسط صلاح‌الدین و همکاران (۲۰۰۴) مورد بررسی واقع شد. مدل $k-\epsilon$ استاندارد، $RNG\ k-\epsilon$ و $Realizable\ k-\epsilon$ و مدل تنش رینولدز از جمله مدل‌های آشفتگی موجود در نرم افزار FLUENT هستند که

مسائل مهم در طراحی پلهایی که در مسیر جریان‌های رودخانه‌ای قرار می‌گیرند، الگوی جریان، توزیع سرعت و تنش برشی در اطراف کوله‌ها و پایه‌های آن است. همچنین با توجه به شکل‌گیری جریانهای چرخشی قوی (در پلان و عمق) در مجاورت این سازه‌ها، استفاده از مدل‌های سه بعدی کامل برای شبیه‌سازی وضعیت جریان اجتناب ناپذیر است. در این مقاله یک مدل عددی سه بعدی با تمرکز بر شبیه‌سازی جریان اطراف پایه‌ها و کوله‌های پلهای رودخانه‌ای و با هدف افزایش کارایی و کاهش هزینه محاسبات توسعه داده شده است.

این محققین پس از تایید صحت عملکرد مدل مذکور با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود، تنش برشی بستر و اختلاف موتموم بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی برای طول‌های مختلف تکیه‌گاه پل و در حالت‌های با و بدون دیوار هدایت بیضوی شکل مورد بررسی قرار گرفته است. اسدی و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D بصورت سه بعدی هندسه‌های مختلف خاکریز دسترسی و دیوارهای هدایت آب در پلهای رودخانه‌ای قرار گرفته در کانالهای مرکب را مدل‌سازی نموده و اثرات آنها را بر الگوی جریان و مقادیر تنش برشی بستر مورد بررسی قرار دادند. همانگونه که اشاره شد، از جمله

۲- معادلات حاکم بر میدان جریان سه بعدی

دارد و مقدار کمیت فشار در حل معادلات تأثیری ندارد، بنابراین می‌توان کمیت فشار را به دو جزء هیدرواستاتیک $(-\rho gz)$ و فشار اضافی (ρP^*) تقسیم نمود (نمین ۲۰۰۳).

معادلات حاکم بر حرکت سیال در حالت کلی شامل معادلات ناویراستوکس و معادله بقای جرم است. در مقاله حاضر معادلات ناویراستوکس متوسط‌گیری شده رینولدز با تقریب بوزینسک، مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه در معادلات مذکور، جریان فقط به مقدار گرادیان فشار بستگی

$$P = -\rho gz + \rho P^* \quad (1)$$

گرادیان فشار در جهات x ، y و z با توجه به رابطه فوق‌الذکر به صورت زیر محاسبه و در روابط اندازه حرکت جایگذاری می‌گردد.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \rho \frac{\partial P^*}{\partial x}$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \rho \frac{\partial P^*}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g + \rho \frac{\partial P^*}{\partial z}$$

بنابراین معادلات اندازه حرکت و پیوستگی با فرض عدم تراکم پذیری آب، در سیستم مختصات کارتزین وقتی محورهای x و y در پلان افقی و محور z بصورت قائم و با جهت مثبت به سمت بالا قرار داشته باشد به شکل روابط ذیل خواهد بود.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(uv) + \frac{\partial}{\partial z}(uw) + \frac{\partial P^*}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t^h \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t^h \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(v_t^v \frac{\partial u}{\partial z}\right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uv) + \frac{\partial}{\partial y}(v^2) + \frac{\partial}{\partial z}(vw) + \frac{\partial P^*}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t^h \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t^h \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(v_t^v \frac{\partial v}{\partial z}\right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uw) + \frac{\partial}{\partial y}(vw) + \frac{\partial}{\partial z}(w^2) + \frac{\partial P^*}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t^h \frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t^h \frac{\partial w}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(v_t^v \frac{\partial w}{\partial z}\right) \quad (5)$$

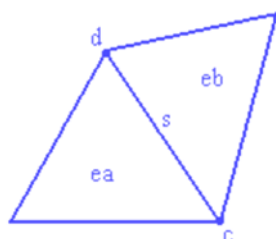
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

در روابط قبل: u ، v و w به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در راستای x ، y و z ، v_t^h و v_t^v ضریب ویسکوزیته گردابه‌ای در راستای افق و قائم و P^* نیز معرف فشار اضافی است.

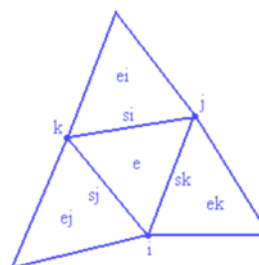
۳- شبکه‌بندی میدان محاسباتی سه بعدی

اطراف پایه‌ها و کوله‌ها، این نوع شبکه‌بندی، شرایط بسیار مناسب و بهینه‌ای را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. برای نیل به این هدف یک برنامه کامپیوتری تولید شبکه توسعه داده شد که ورودی آن داده‌های میدان هندسی مورد مطالعه و خروجی آن اطلاعات هندسی المان‌بندی مورد نیاز جهت حل معادلات منقطع شده است. در برنامه تهیه شده ابتدا پلان میدان سه بعدی با استفاده از برنامه EASYMESH به صورت دو بعدی و با المانهای مثلثی شبکه‌بندی می‌گردد. موقعیت یک المان و یک یال در شبکه دو بعدی به ترتیب در شکل ۱-الف و ۱-ب نشان داده شده است.

برای حل عددی معادلات حاکم، ابتدا باید میدان محاسباتی را شبکه‌بندی نمود. برای شبکه‌بندی میدان محاسباتی روشهای مختلفی وجود دارد که بسته به روش حل معادلات و نوع شبکه مورد نیاز، می‌تواند متفاوت باشد. شبکه مورد استفاده در حل معادلات باید به نحوی باشد که بیشترین دقت با کمترین تعداد المان از مدل به دست آید. با توجه به اینکه اغلب جریانهای طبیعی در اطراف پلها دارای هندسه پیچیده می‌باشند، در مقاله حاضر به منظور گسسته‌سازی میدان محاسباتی سه بعدی در صفحه افقی، شبکه بدون ساختار مثلثی و در صفحه قائم، شبکه با ساختار مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به طول بازه های مورد نیاز برای شبیه سازی جریان، ماهیت و نوع آن در



(ب)



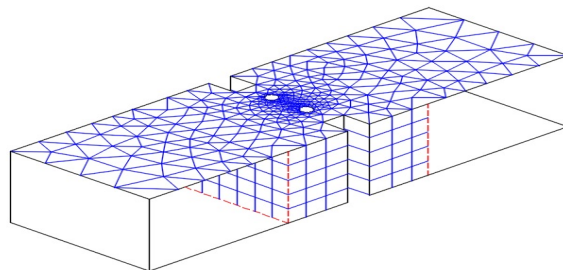
(الف)

شکل ۱. تعریف مشخصات شبکه دو بعدی در پلان ناحیه حل: (الف) تعریف گره‌ها و یالها یک المان به همراه المانها مجاور آن،

(ب) موقعیت یک یال و تعریف گره‌های ابتدا، انتها و المانهای سمت چپ و راست آن

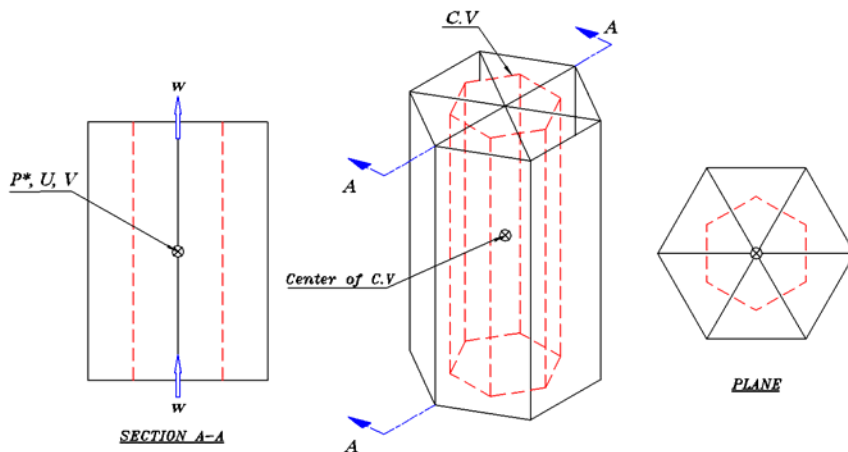
عمق متوسط جریان، تراز متوسط سطح آزاد آب نسبت به خط مبنا محاسبه می‌گردد. حال براساس تراز خط مبنا، تراز متوسط سطح آزاد و ضخامت انتخاب شده برای لایه‌ها (که از ورودی برنامه خوانده می‌شود)، حداکثر تعداد لایه‌ها در عمق محاسبه می‌گردد. نمونه‌ای از شبکه سه بعدی تولید شده در شکل ۲ ارائه شده است. با توجه به شکل مذکور، دامنه محاسباتی سه بعدی به منشورهایی با قاعده مثلث تقسیم‌بندی شده است.

برای شبکه‌بندی میدان محاسباتی سه بعدی سعی بر این است که اطلاعات شبکه سه بعدی مشابه با اطلاعات شبکه دو بعدی در نظر گرفته شود. در برنامه توسعه داده شده برای تولید شبکه سه بعدی، ابتدا کلیه اطلاعات مربوط به شبکه دو بعدی خوانده شده و با توجه به توپوگرافی بستر به هر کدام از گره‌های شبکه دو بعدی، تراز بستر اختصاص داده می‌شود. پایین‌ترین تراز بستر به عنوان تراز خط مبنا تعیین و با توجه به



شکل ۲. شبکه‌بندی میدان محاسباتی سه بعدی

قرار گیرد، محل ذخیره سازی متغیرهای مختلف است. در تحقیق حاضر، با توجه به شبکه محاسباتی تولید شده، مقادیر u, v و P^* در مرکز حجم کنترل و مقدار w بر روی مرزهای آن ذخیره می‌گردد. در شکل ۳ محل ذخیره سازی متغیرهای مختلف نشان داده شده است.



شکل ۳. محل ذخیره سازی متغیرهای مختلف در شبکه محاسباتی سه بعدی

در این تحقیق برای منقطع سازی معادلات حاکم، روش حجم محدود و گام جزئی مورد استفاده قرار گرفته است. در روش حجم محدود، میدان حل به احجام کوچکی تقسیم‌بندی شده و از معادلات حاکم بر روی این حجم‌ها انتگرال‌گیری می‌شود. از جمله موارد مهمی که باید مورد توجه

۴-تکنیک عددی حل معادلات سه بعدی جریان

در تحقیق حاضر از روش گام جزئی برای حل معادلات حاکم استفاده شده است. روش حل شامل دو گام اصلی است.

۴-۱-گام اول (حل معادله انتقال)

انتقال یافته و میدان سرعت جدیدی در گام زمانی میانی به دست می‌آید. در این مرحله معادله جابجایی با استفاده از روش صریح فروم در پلان و روش ضمنی کرانک نیکلسون در صفحه قائم حل می‌گردد.

در گام اول، معادلات اندازه حرکت (معادلات (۳) تا (۵)) بدون در نظر گرفتن ترم گرادیان فشار حل می‌شوند. این گام را می‌توان به دو مرحله جابجایی و پخش تقسیم نمود. در مرحله اول مؤلفه‌های سرعت با استفاده از میدان جریان گام زمانی n م

$$\frac{u^* - u^n}{\Delta t} = - \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right]^n - \left[w \frac{\partial u}{\partial z} \right]^* \quad (7)$$

$$\frac{v^* - v^n}{\Delta t} = - \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right]^n - \left[w \frac{\partial v}{\partial z} \right]^* \quad (8)$$

$$\frac{w^* - w^n}{\Delta t} = - \left[u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} \right]^n - \left[w \frac{\partial w}{\partial z} \right]^* \quad (9)$$

در مرحله بعد ترم پخش معادله اندازه حرکت حل شده و میدان سرعت در گام زمانی میانی دوم محاسبه می‌گردد. در این مرحله نیز معادله پخش با استفاده از روش صریح در پلان و روش ضمنی کرانک نیکلسون در صفحه قائم حل می‌گردد.

$$\frac{u^{**} - u^*}{\Delta t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(v_t^h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t^h \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right]^* + \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(v_t^v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right]^{**} \quad (10)$$

$$\frac{v^{**} - v^*}{\Delta t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(v_t^h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t^h \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right]^* + \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(v_t^v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right]^{**} \quad (11)$$

$$\frac{w^{**} - w^*}{\Delta t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(v_t^h \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t^h \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right]^* + \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(v_t^p \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right]^{**} \quad (12)$$

k-ε تعیین می‌گردند. جزئیات و تکنیک های خاص روشهای حل معادله انتقال در نمین و همکاران (۲۰۰۴) و کیلانه ئی (۱۳۹۰) آمده است.

در تحقیق حاضر ضریب ویسکوزیته گردابه‌ای افقی (v_t^h) (با استفاده از مدل زیر مقیاس اسماکورینسکی و ضریب ویسکوزیته گردابه‌ای قائم (v_t^p) با استفاده از آنالیز یک بعدی

۴-۲- گام دوم (تشکیل معادله پواسون)

در گام دوم معادله پیوستگی و اندازه حرکت بدون در نظر گرفتن ترم‌های جابجایی و پخش به طور همزمان حل می‌شوند. با توجه به مراحل قبلی، معادلات ذیل باقی مانده‌اند.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^{n+1} + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^{n+1} + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^{n+1} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{u^{n+1} - u^{**}}{\Delta t} + \left[(\psi) \left(\frac{\partial P^*}{\partial x} \right)^{n+1} + (1 - \psi) \left(\frac{\partial P^*}{\partial x} \right)^n \right] = 0 \quad (14)$$

$$\frac{v^{n+1} - v^{**}}{\Delta t} + \left[(\psi) \left(\frac{\partial P^*}{\partial y} \right)^{n+1} + (1 - \psi) \left(\frac{\partial P^*}{\partial y} \right)^n \right] = 0 \quad (15)$$

$$\frac{w^{n+1} - w^{**}}{\Delta t} + \left[(\psi) \left(\frac{\partial P^*}{\partial z} \right)^{n+1} + (1 - \psi) \left(\frac{\partial P^*}{\partial z} \right)^n \right] = 0 \quad (16)$$

در روابط فوق ψ فاکتور وزنی است که در مقاله حاضر برابر با عدد یک انتخاب شده است.

۵- شرایط اولیه و شرایط مرزی برای حل معادلات سه بعدی

شرط مرزی بدون لغزش باشد. در تحقیق حاضر از هر دو نوع شرط مرزی در مسائل مختلف استفاده شده است. در شرط مرزی لغزش آزاد مؤلفه مماسی سرعت بر مرز به کمک سرعت‌های محاسبه شده در شبکه و با استفاده از زاویه دیوار تعیین می‌گردد. در حالت دیوار بدون لغزش، تمامی مؤلفه‌های سرعت جریان در روی دیوار برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. در حالتی که جریان در میدان به صورت آشفته باشد، گردایان سرعت در نزدیک دیوار شدید خواهد بود و شبیه‌سازی آن نیازمند شبکه بسیار ریز در نزدیکی دیوار می‌باشد. برای پرهیز از شبکه بسیار ریز در نزدیک دیوار، سرعت در امتداد عمود بر دیوار برابر با صفر منظور شده و برای مؤلفه سرعت در راستای دیوار از قانون دیواره برای اعمال اثر دیوار استفاده شده است. شرط مرزی اصلی در سطح آزاد آب، فشار معلوم هوا است. با توجه به تغییرات تراز سطح آزاد آب، رابطه پیوستگی برای آخرین حجم کنترل در جهت قائم (حجم کنترل مجاور سطح آزاد آب، i, k, k)، تبدیل به رابطه ۱۷ می‌شود. در رابطه (۱۷)، η ، تراز سطح آزاد آب نسبت به خط مبنا است. با توجه

برای حل معادلات سه بعدی لازم است تا برای همه متغیرها در کلیه نقاط شبکه، مقداری اولیه فرض نمود و در مرزهای جریان شرایط مرزی را اعمال کرد. شرایط اولیه در مدل سه بعدی حاضر شامل مقادیر فشار اضافی، سرعت‌های اولیه در سه راستا و انرژی جنبشی آشفته و نرخ استهلاك آن (در مدل آشفته‌گی یک بعدی k-ε) است. شرایط اولیه سرعت جریان را می‌توان کسری از مقادیر سرعت متوسط در نظر گرفت. مقادیر فشار اضافی عمدتاً با توجه به تراز اولیه سطح آزاد آب تعیین می‌شود. جهت تعیین شرایط اولیه در مدل آشفته‌گی یک بعدی k-ε از مقادیر حداقل پیشنهاد شده برای k و ε می‌توان استفاده نمود. ضریب ویسکوزیته گردابه‌ای قائم نیز با توجه به مقادیر k و ε حداقل، قابل محاسبه است. در مرزهای ورودی و خروجی بسته به نوع جریان، شرایط مرزی مختلفی را می‌توان در نظر گرفت. در تحقیق حاضر عموماً از شرط مرزی مقدار سرعت معلوم در مرز بالادست و شرط مرزی فشار اضافی معلوم در مرز پایین‌دست استفاده شده است. شرط مرزی در محل دیواره‌ها می‌تواند به صورت شرط مرزی لغزش آزاد یا

حجم کنترل آخرین لایه به عنوان خط مبنا در نظر گرفته می‌شود.

به اینکه در این تحقیق مدل‌سازی سطح آزاد آب با فرض فشار هیدرواستاتیک در لایه آخر لحاظ می‌گردد بنابراین ضلع پایینی

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} = w \quad (17)$$

۶- ارزیابی مدل سه بعدی

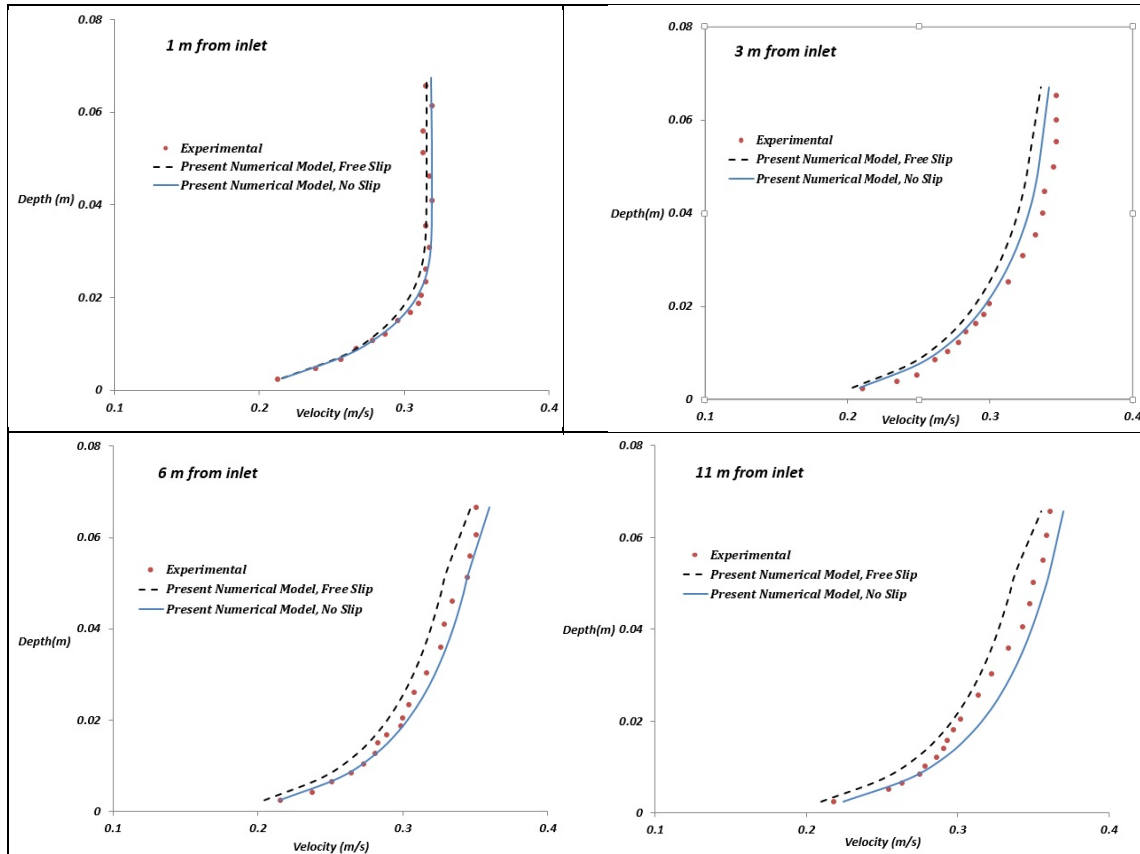
به منظور ارزیابی مدل سه بعدی تهیه شده، آزمون توسعه لایه مرزی در کانال مستطیلی روباز در نظر گرفته شده است.

۶-۱- توسعه لایه مرزی در کانال مستطیلی روباز

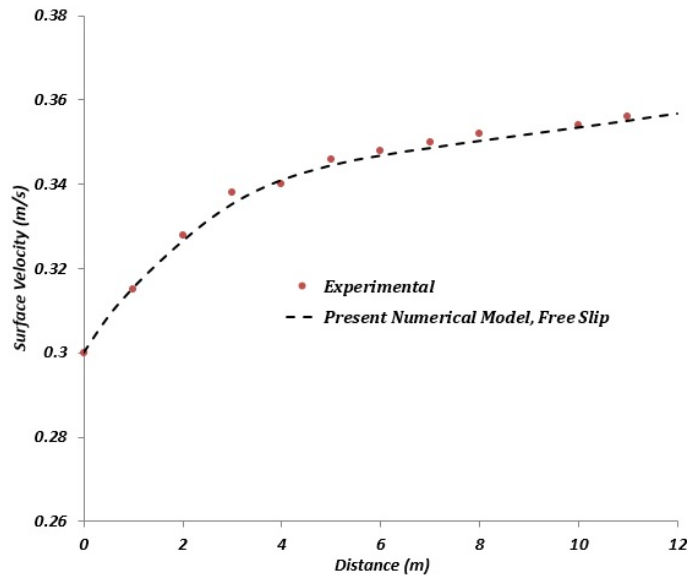
متر بر ثانیه برای کلیه سلولهای مرز ورودی به عنوان شرط مرزی بالادست و تراز ثابت ۰/۰۷۵ متر به عنوان شرط مرزی پایین دست اعمال شده است. در این آزمون، بستر از لحاظ هیدرولیکی صاف در نظر گرفته شده است. به منظور امکان مقایسه، در دیواره‌های کانال از هر دو فرض لغزش آزاد و عدم لغزش استفاده شده است. در شکل ۴ نتایج مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی در فواصل ۱، ۳، ۶ و ۱۱ متری از ورودی کانال و در خط مرکزی آن ارائه شده است. با توجه به شکل مذکور، نتایج مدل عددی برای هر دو حالت، توافق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند.

همچنین در شکل ۵ مقادیر سرعت سطحی در امتداد ناحیه توسعه لایه مرزی حاصل از مدل‌سازی عددی به همراه داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه شده است. مقایسه نتایج، دقت و عملکرد مناسب مدل عددی را تأیید می‌نماید. جذر متوسط مربع خطاها برای پیش‌بینی مقادیر سرعت در تراز سطح آزاد آب برای حالت لغزش آزاد برابر ۰/۱۲ درصد است.

در این آزمون جریان با سرعت ثابت به یک کانال با مقطع مربع مستطیل مستقیم وارد می‌شود و توسعه لایه مرزی که به صورت سه بعدی از طرف دیواره‌ها و بستر کانال شکل می‌گیرد، مدل‌سازی می‌شود. رانگراجو و همکاران (۲۰۰۰) با انجام آزمایش‌هایی توسعه لایه مرزی در کانال روباز را به صورت سه بعدی مورد مطالعه قرار دادند. در آزمون حاضر، اجرای شماره ۸ از آزمایشات این محققین شبیه‌سازی می‌گردد. آزمایشات در فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۵ و عرض ۰/۷۵ متر انجام شده است. عمق جریان و سرعت یکنواخت جریان در مقطع ورودی به ترتیب برابر با ۷/۵ سانتی‌متر و ۰/۳ متر بر ثانیه بوده است. در فواصل مختلف از ورودی کانال و در امتداد خط مرکزی آن، پروفیل سرعت جریان در عمق توسط این محققین گزارش شده است. در این آزمون مقطع سازی محیط فیزیکی در پلان با استفاده از ۱۱۰۸۴ المان مثلثی که ابعاد آن در حدود ۰/۰۵ متر است، انجام شده است. صفحه قائم نیز با استفاده از ۱۲ سلول در عمق تفکیک شده است. سرعت ثابت برابر با ۰/۳



شکل ۴. نتایج مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی در فواصل ۱، ۳، ۶ و ۱۱ متری از ورودی کانال



شکل ۵. مقادیر سرعت در تراز سطح آزاد آب در امتداد ناحیه توسعه لایه مرزی حاصل از مدل‌سازی عددی به همراه داده‌های اندازه‌گیری شده

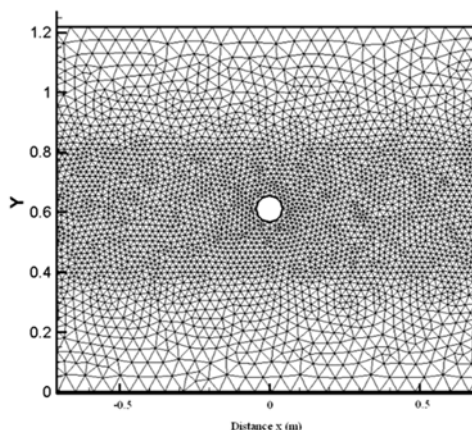
۷- کاربرد مدل عددی

در این قسمت، شبیه‌سازی جریان اطراف یک پایه پل و کوله پل انتخاب شده است. برای هر سازه، یک آزمون آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است.

۷-۱- مدل‌سازی جریان اطراف پایه پل

مدلهای آزمایشگاهی فراوانی در زمینه پیش‌بینی جریان و آبشستگی اطراف پایه‌های پل انجام شده است که در این قسمت نتایج آزمایشگاهی احمد و راجاراتنام (۱۹۹۸) مورد استفاده قرار می‌گیرد (آزمایش C2R). آزمایشات در فلوم

آزمایشگاهی به طول ۲۰ متر و عرض ۱/۲۲ متر انجام، و یک سیلندر به قطر ۰/۰۸۹ متر به عنوان پایه پل در نظر گرفته شده است. سرعت جریان نزدیک شونده و عمق آن به ترتیب برابر با ۰/۲۹۲۷ متر بر ثانیه و ۰/۱۸۲ متر است. در این آزمون دامنه محاسباتی به ابعاد ۵×۱/۲۲ متر که پایه پل در میانه آن قرار دارد، در نظر گرفته شد. با عنایت به قابلیت مدل عددی توسعه داده شده و به منظور امکان بررسی دقیق‌تر جزئیات جریان اطراف پایه، ابعاد شبکه در آن ناحیه مطابق شکل ۶ ریزتر شده است. در این آزمون کل دامنه محاسباتی با استفاده از ۲۶۷۷۰ المان مثلثی در پلان و ۳۴ لایه عمقی شبکه‌بندی شده است.



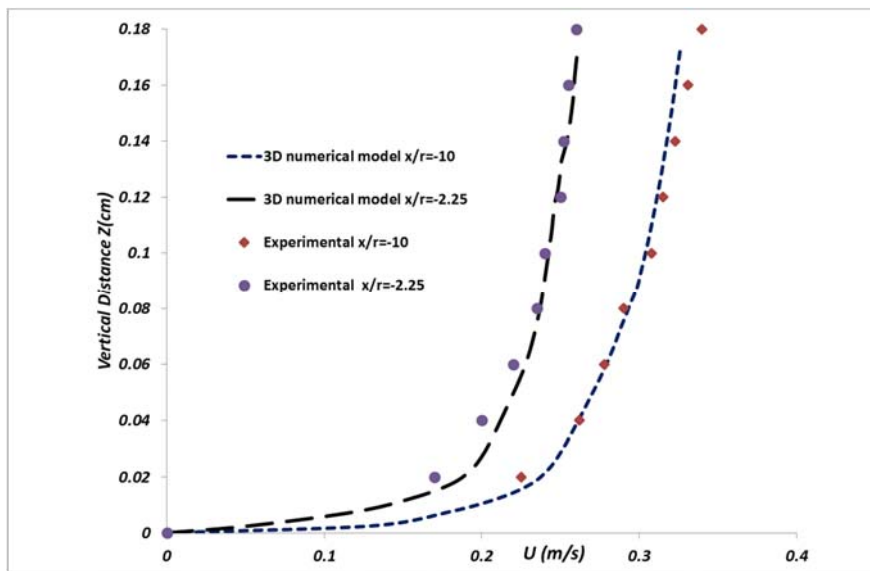
شکل ۶. شبکه‌بندی استفاده شده اطراف پایه پل در صفحه x-y

مقادیر حداکثر و حداقل خطای نسبی و جذر متوسط مربع خطاها برای مقادیر مؤلفه طولی سرعت (u) در جدول ۱ آمده است. با توجه به نتایج جدول مذکور و شکل ۱۱ تطابق بسیار خوبی بین نتایج مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

نتایج توزیع عمودی مؤلفه طولی سرعت (u) با استفاده از مدل سه بعدی در فواصل مختلف از پایه (بالادست پایه) به همراه داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۷ ارائه شده است. در این شکل $x/r=0$ بیانگر مختصات مرکز پایه است.

جدول ۱. خطاهای محاسبه شده حل عددی جریان اطراف پایه پل (درصد)

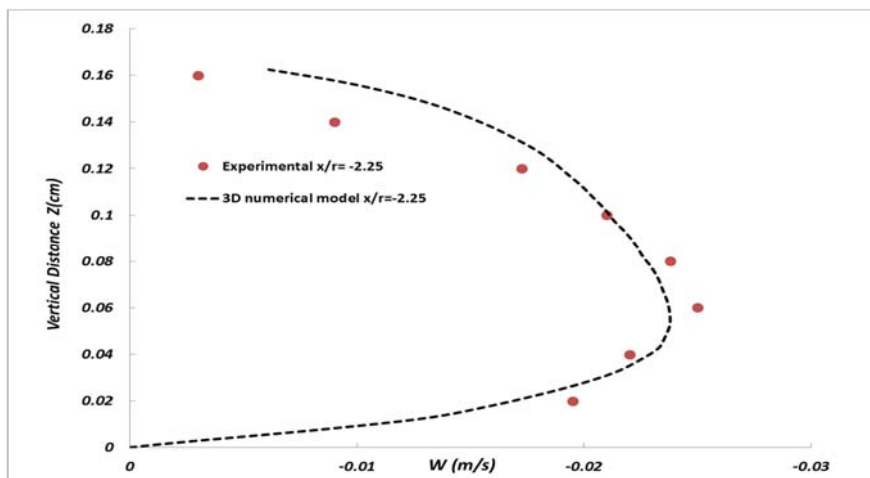
فاصله نسبت به مرکز پایه	حداکثر خطای نسبی	جذر متوسط مربع خطاها	حداقل خطای نسبی
$x/r=-10$	۵/۲۱	۰/۷۰۴۴	۰/۲۲۷
$x/r=-2/25$	۳/۸۸	۰/۷۳۵	۰/۳۱



شکل ۷. توزیع عمودی مولفه طولی سرعت (U) با استفاده از مدل سه بعدی در فواصل مختلف از پایه به همراه داده‌های آزمایشگاهی

توجه به شکل ۸ و مقایسه نتایج مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی، عملکرد مناسب مدل عددی سه بعدی را تایید می‌نماید.

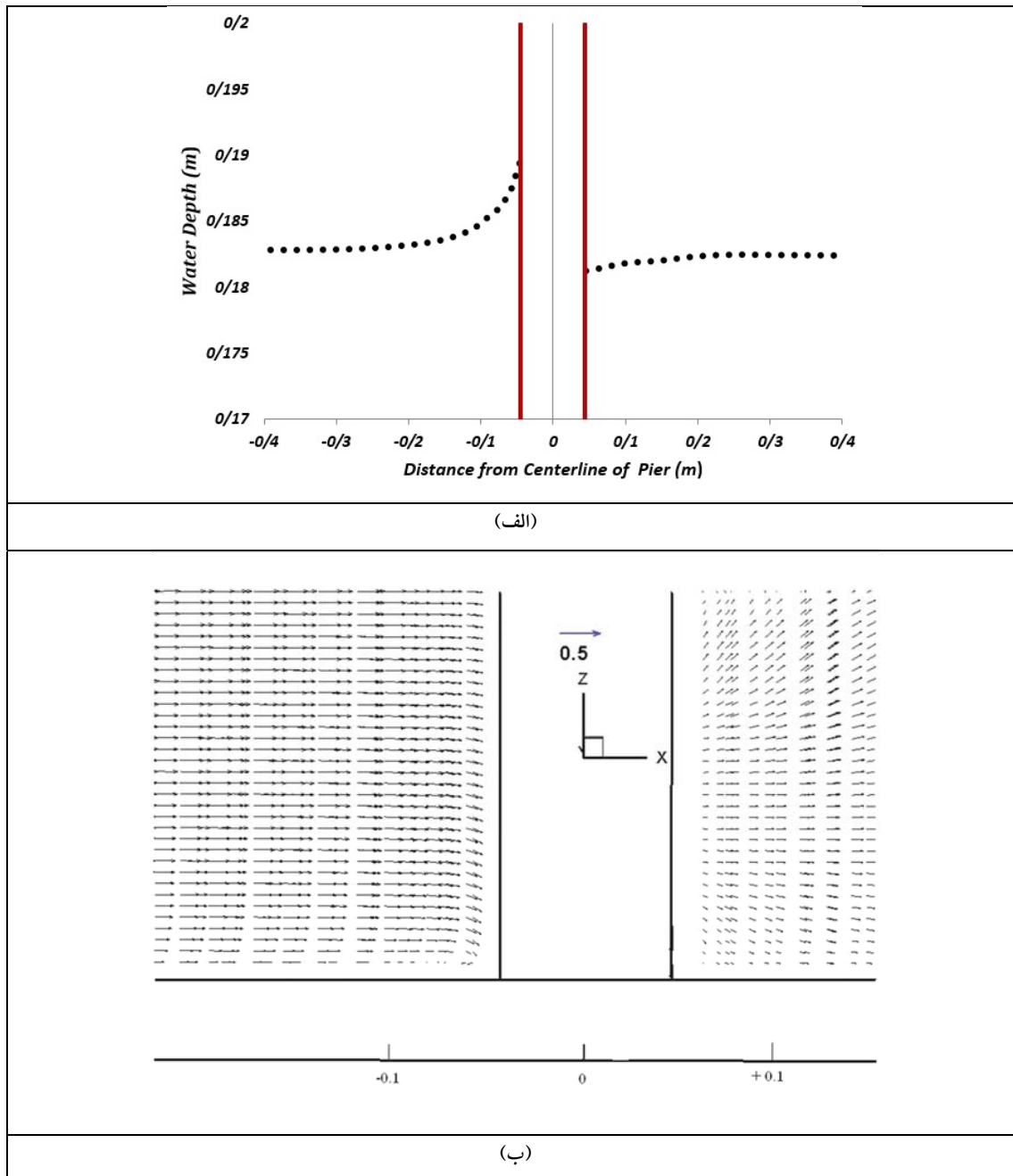
توزیع در راستای عمق مؤلفه قائم سرعت (W) در $x/r=-2/25$ (نزدیکی پایه و بالادست آن) حاصل از مدل سه بعدی به همراه داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۸ آمده است. جذر متوسط مربع خطاها در این حالت برابر با ۳/۰۳ درصد است.



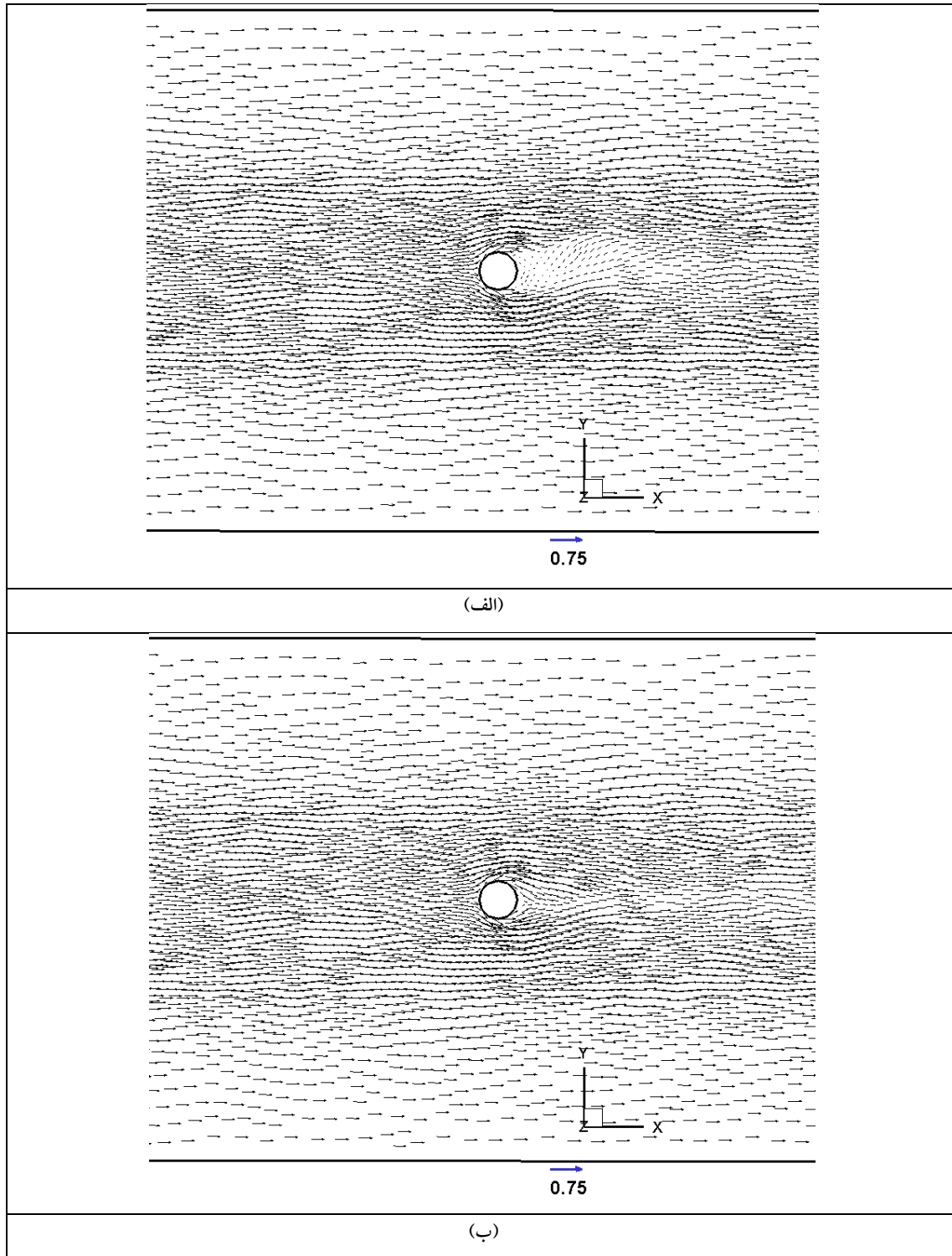
شکل ۸. توزیع عمودی مولفه قائم سرعت (W) با استفاده از مدل سه بعدی در $x/r=-2/25$ به همراه داده‌های آزمایشگاهی

و جریان پایین رونده در جلوی پایه را شبیه‌سازی نموده است. همچنین الگوی جریان در اطراف پایه در مقطع X-Y در دو تراز مختلف $(z=0.165, 0.1m)$ در شکل ۱۰ آمده است.

در شکل ۹ تغییرات تراز سطح آزاد آب و الگوی جریان در امتداد صفحه تقارن پایه $(y=0.61)$ با استفاده از مدل عددی ارائه شده است. همانگونه که از شکل پیداست مدل عددی به خوبی افزایش و کاهش تراز سطح آزاد آب قبل و بعد از پایه



شکل ۹. نتایج مدل عددی در امتداد صفحه تقارن پایه ($y=0.61$ متر)، (الف) تغییرات تراز سطح آزاد آب و (ب) الگوی جریان

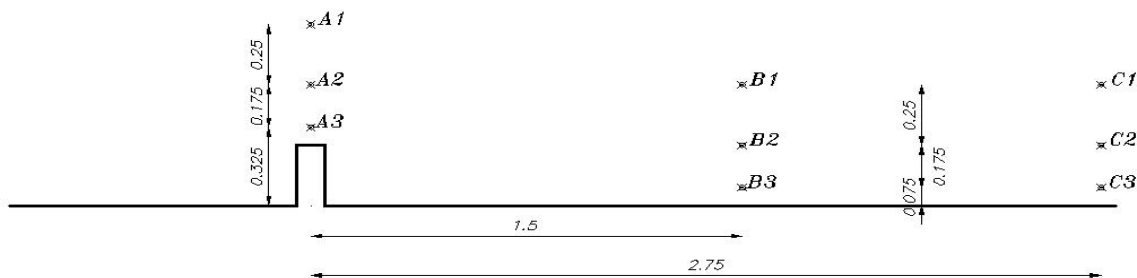


شکل ۱۰. الگوی جریان در اطراف پایه پل حاصل از مدل عددی در مقطع $x-y$ در دو تراز مختلف، الف) $z=0.165$ متر، ب) $z=0.1$ متر

۷-۲- مدل‌سازی جریان اطراف کوله مستطیلی پل

محاسباتی به ترتیب برابر با ۱۵ و ۲/۵ متر و فاصله کوله از مرز بالادست برابر با ۵ متر در نظر گرفته شد. کل دامنه محاسباتی با استفاده از ۱۴۱۲۲ المان مثلثی در پلان و ۲۰ لایه عمقی شبکه‌بندی شده است. توزیع عمودی مولفه‌های طولی (u) و عرضی (v) سرعت در نقاط $A1$ ، $B1$ ، و $C1$ با استفاده مدل سه بعدی و همچنین داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۱۲ ارائه شده است. جذر متوسط مربع خطاها برای مقادیر مؤلفه طولی و عرضی سرعت در جدول ۲ آمده است. با توجه به نتایج جدول مذکور و شکل ۱۲، مقادیر سرعت‌های محاسبه شده با استفاده از مدل سه بعدی، تطابق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند.

الگوی جریان اطراف کوله‌های پل‌ها به صورت گسترده‌ای توسط پژوهشگران مختلف با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. در دومین گام جهت بررسی مدل عددی، نتایج مدل آزمایشگاهی هلنز مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج این آزمایش نیز قبلاً توسط مایرلی و همکاران (۱۹۹۵) جهت ارزیابی مدل سه بعدی به کار رفته است. آزمایشات در فلوم آزمایشگاهی به طول ۳۲/۴ متر، عرض ۲/۵ متر و با کف سیمانی و دیواره‌های عمودی صیقلی انجام شده است. کوله مکعب شکلی به طول ۲۵ سانتیمتر و ضخامت ۵ سانتی‌متر در امتداد عمود بر محور فلوم قرار داده شده است. آزمایشات برای دبی ۲۰۰ لیتر بر ثانیه و عمق ۲۳ سانتیمتر انجام و عدد ضریب زبری مانینگ برابر با ۰/۰۲ گزارش شده است. اندازه‌گیری سرعت با استفاده از دستگاه اولتراسونیک و در امتداد چند محور انجام شده است. موقعیت نقاط اندازه‌گیری سرعت در شکل ۱۱ ارائه شده است. در این آزمون، طول و عرض دامنه



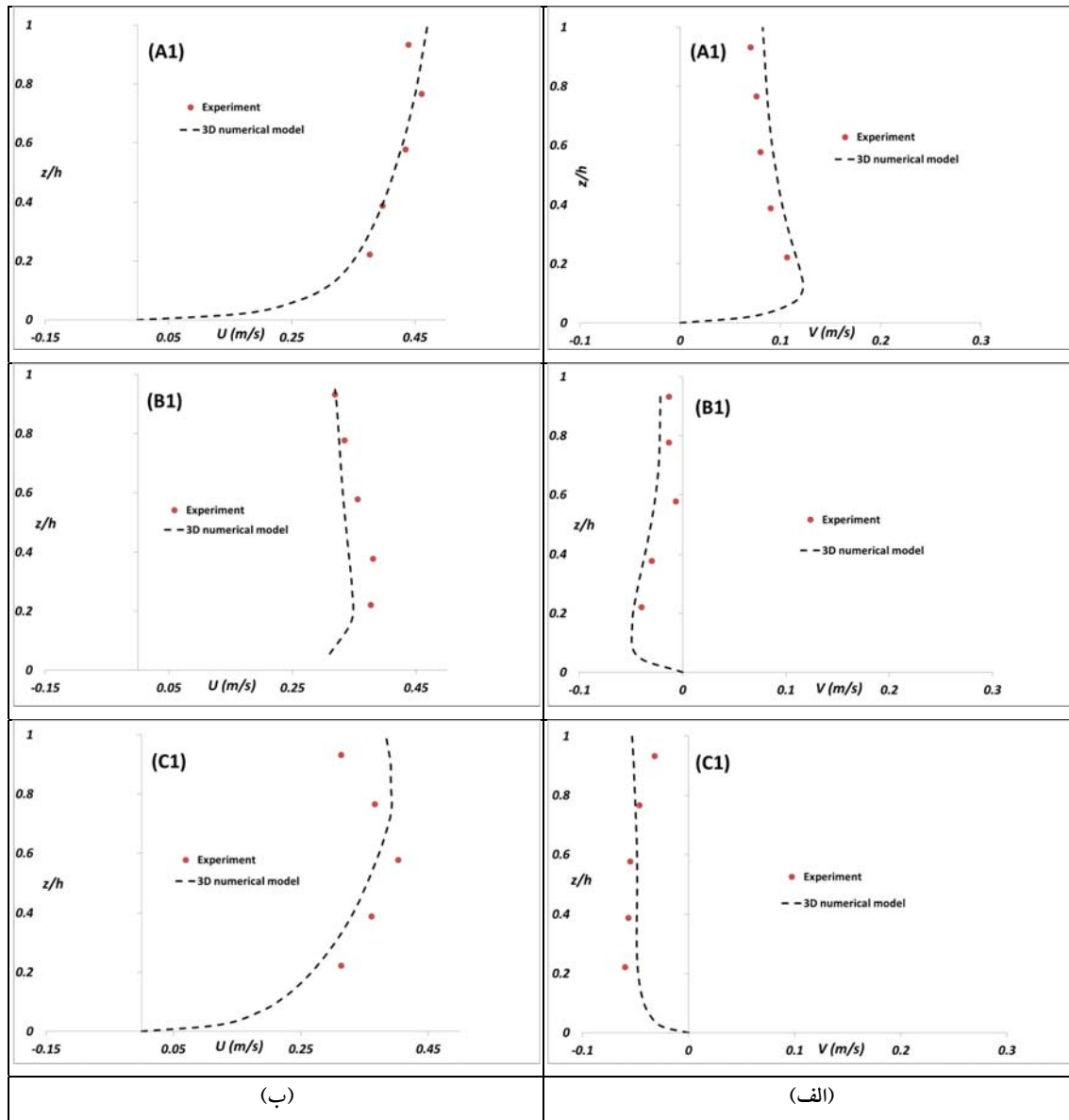
شکل ۱۱. موقعیت نقاط اندازه‌گیری سرعت در مدل آزمایشگاهی هلنز (متر)

جدول ۲. جذر متوسط مربع خطاهای حل عددی جریان اطراف کوله پل (درصد)

مؤلفه عرضی سرعت (v)	مؤلفه طولی سرعت (u)	نقطه اندازه‌گیری
۵/۲۱	۱/۵۹	$A1$
۷/۱۲	۳/۰۸	$B1$
۵/۱۳	۵/۳۲	$C1$

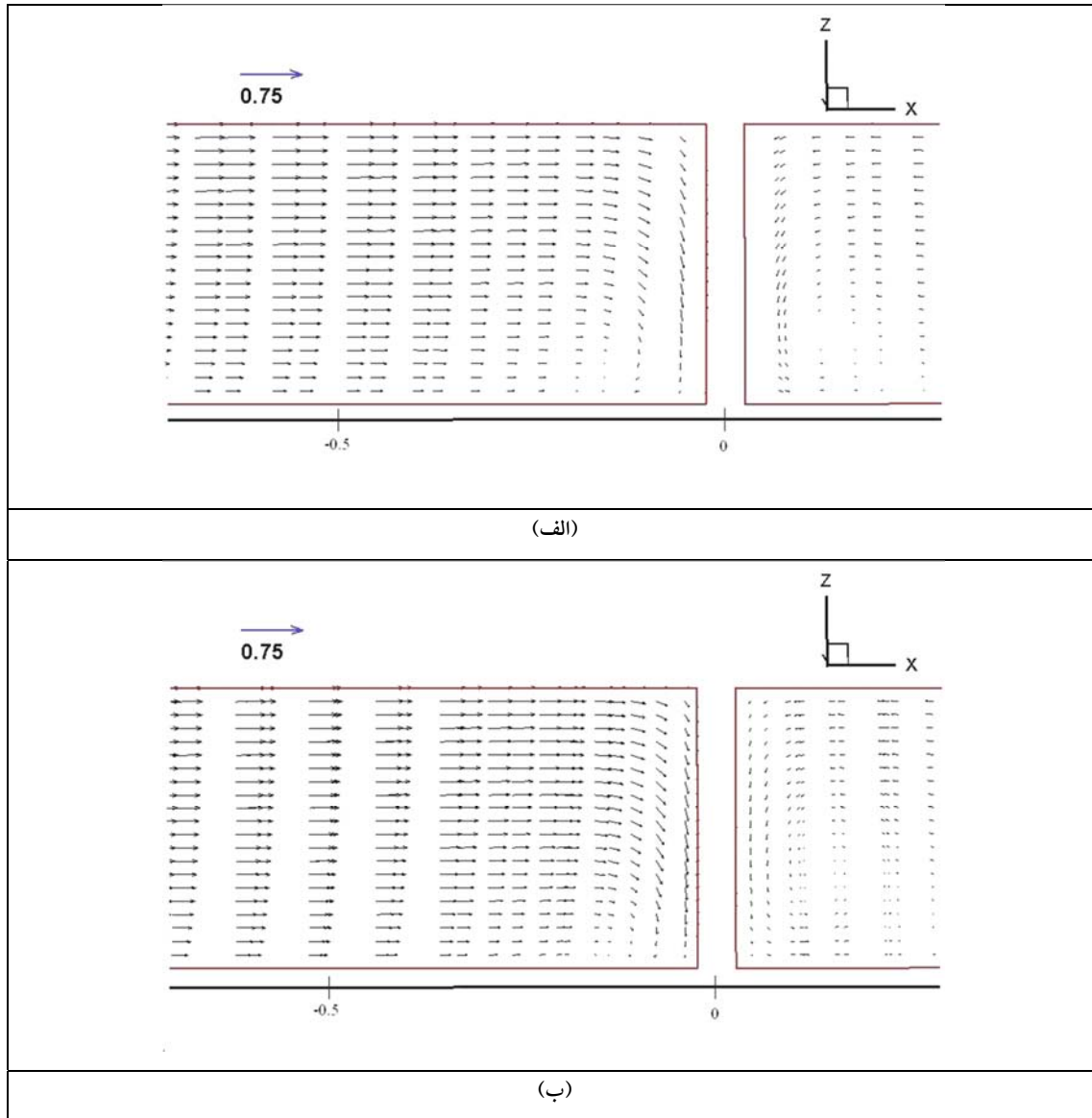
طول ناحیه چرخشی در پایین‌دست کوله به طول کوله در ترازهای مختلف در حدود ۱۲/۲ است. در مطالعه آزمایشگاهی نسبت مذکور برابر با ۱۱/۵ گزارش شده است که با توجه به عدد به دست آمده از مدل عددی، مقدار خطای نسبی در پیش‌بینی طول گردابه پایین‌دست در حدود ۶ درصد است.

در شکل ۱۳ الگوی جریان در دو مقطع طولی ($y=0.05$ ، 0.15 متر) حاصل از مدل عددی ارائه شده است. با توجه به شکل مذکور، ملاحظه می‌گردد که مدل عددی، جریان پایین رونده در بالادست کوله پل را به خوبی پیش‌بینی نموده است. همچنین در شکل ۱۴ الگوی جریان در دو مقطع از پلان در ترازهای مختلف ($z=0.1$ ، 0.2 متر) آمده است. در این شکل،

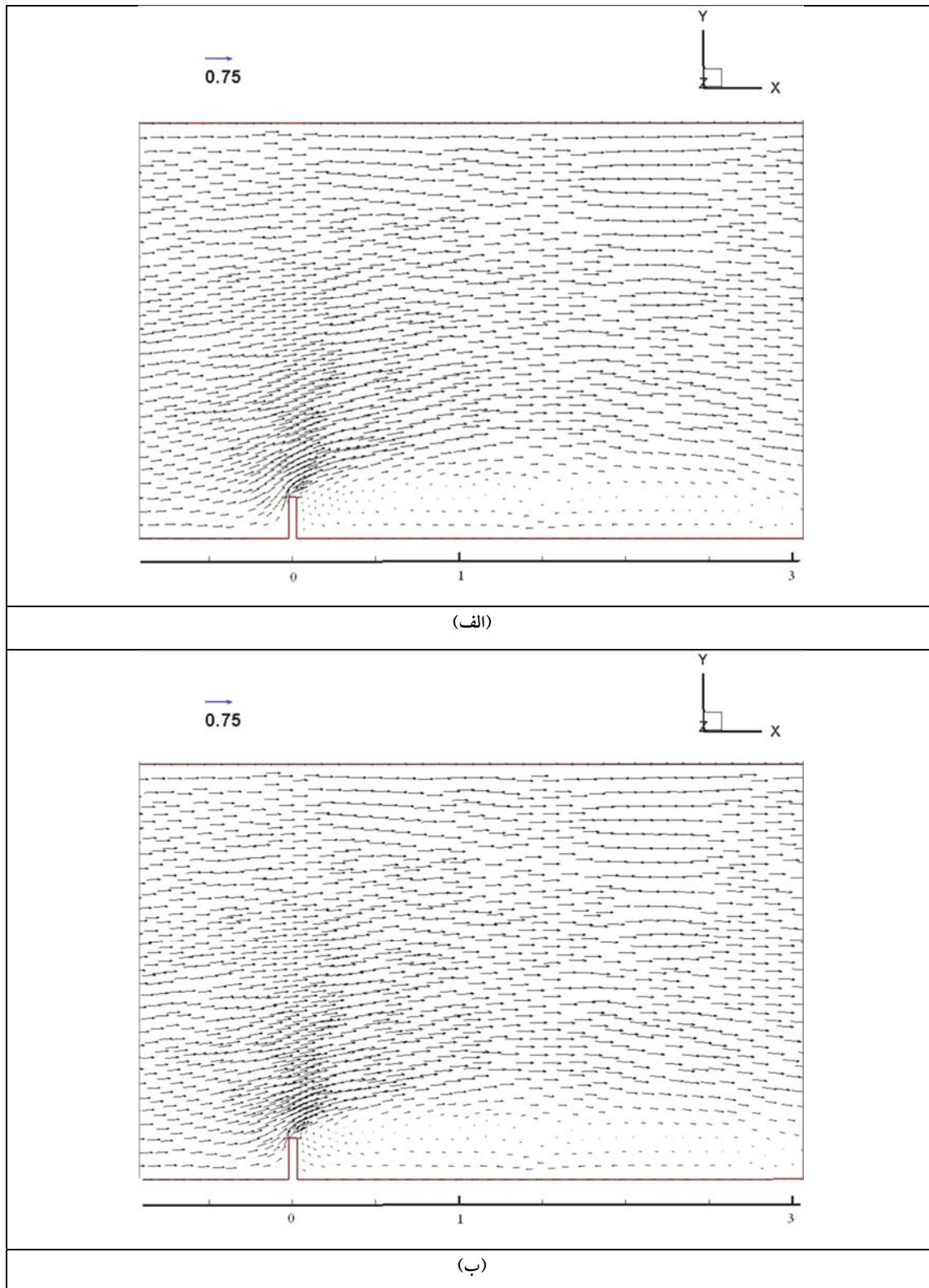


شکل ۱۲. مقایسه پروفیل‌های سرعت حاصل از مدل سه بعدی (منحنی خط چین) با داده‌های آزمایشگاهی (دایره توپر) در نقاط A1، B1 و C1.

C1، الف) سرعت عرضی (V)، ب) سرعت طولی (u)



شکل ۱۳. الگوی جریان اطراف کوله پل با استفاده از مدل عددی. الف) $y=0.05m$ ، ب) $y=0.15m$



شکل ۱۴. الگوی جریان در ترازهای مختلف در نزدیکی کوله پل با استفاده از مدل عددی، الف) $z=0.1m$ ب) $z=0.2m$

۸- نتیجه گیری

در جهت قائم) انجام گرفته است. جهت در نظر گرفتن تراز سطح آزاد آب در مدل سه بعدی، فشار لایه آخر با فرض فشار هیدرواستاتیک تعیین گردیده است. در ادامه جهت اطمینان از عملکرد صحیح مدل سه بعدی تهیه شده و بررسی صحت نتایج حاصل از آن، مدل با استفاده از آزمون توسعه لایه مرزی سه بعدی در کانال روباز، مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه نتایج مدل سه بعدی با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی آزمونهای ذکر شده، عملکرد مناسب مدل سه بعدی را مورد تایید قرار داد. در نهایت به منظور بررسی توان، دقت و کارآمدی مدل سه بعدی توسعه داده شده، جریان اطراف یک پایه پل و کوله پل در نظر گرفته شد. مقایسه نتایج حاصله از مدل عددی اطراف دو سازه هیدرولیکی ذکر شده، مبین دقت بسیار مناسب مدل همزمان با افزایش کارایی آن بود.

در این مطالعه یک مدل عددی سه بعدی به منظور شبیه سازی جریان اطراف کوله و پایه پل های رودخانه ای پیشنهاد و توسعه داده شد. از آنجایی که ساختار جریان اطراف کوله و پایه پل به علت وجود جریان های پایین رونده و شتاب در جهت قائم، دارای ساختاری سه بعدی و بسیار پیچیده است بنابراین استفاده از مدل های سه بعدی برای بررسی جزئیات ساختار جریان ضروری است. در این مقاله معادلات سه بعدی با استفاده از روش حجم محدود و گام جزئی بر روی یک شبکه بدون ساختار مثلثی در پلان و با ساختار در صفحه قائم حل شد در مدل عددی، معادله انتقال (جابجایی و پخش) در صفحه افقی با استفاده از روش صریح و در صفحه قائم با استفاده از روش ضمنی حل شده اند. مدل سازی آشفتگی بر اساس مدل مختلط (اسماگورینسکی در پلان و یک بعدی $k-\epsilon$)

۹- مراجع

-هادیان م.ح.، زراتی ا.ر.، (۱۳۸۸). مدل های عددی آب های کم عمق و کاربرد آنها در مهندسی رودخانه و سواحل، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران).

-Ahmed F, Rajaratnam N. (1998). Flow around bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(3): 288-300.

-Asadi, M., Kilanehei, F., Mahjoob, A., (2022). Numerical Study of Road Embankment Type Action on Shear Stress Around Skewed Bridge Abutment, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, Vol. 17 Issue 4: 95-119

-Cui Z, Zhang X. (2005). Flow and sediment simulation around spur dike with free surface using 3D turbulent model, *Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics*, 237-244.

-Dargahi B, (1987). Flow field and local scouring around a pier. Bulletin No. TRITA-VB1-137, Hydraulic Laboratory, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

-Kimura I, Hosoda T., (2003). A non linear $k-\epsilon$ model with realizability for prediction of flows around bluff bodies. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 42: 813-837.

-آقایی شلمانی، یاسین و حکیم زاده حبیب (۱۳۸۷). مدل عددی سه بعدی جریان اطراف پایه های استوانه ای شکل به روش حجم محدود، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

-صفائی، سعید، کیلانهئی، فواد و محجوب، امیر (۱۳۹۹). مدل سازی عددی تاثیر طول کوله پل در سیلاب-دشت بر تنش برشی بستر و مومنتوم جریان، نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، جلد بیست و هفتم، شماره ششم.

-کیلانهئی، فواد (۱۳۹۰). توسعه مدل دو بعدی - سه بعدی شبیه سازی جریان در اطراف سازه های هیدرولیکی رودخانه ای، رساله دکترای تخصصی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

-نائینی س.ت.ا.، فضلوی م.، (۱۳۹۰). بهره گیری مشترک از مدل عددی و مشاهده فیزیکی در تعیین اثر شکل مقاطع پایه پل ها بر نیروهای دینامیکی وارد بر آن، مجله دانشکده فنی دانشگاه تهران.

-هادیان م.ح.، زراتی ا.ر.، (۱۳۸۴). ارائه یک مدل ریاضی برای پیش بینی وضعیت جریان و توپوگرافی بستر در محل پل ها، پایان نامه دکترای تخصصی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

- Olsen N, Melaaen M, 1993. Three-dimensional calculations of scour around cylinders. *Journal of Hydraulic Engineering*. 119(9): 1048-1054.
- Ouillon S, Dartus D, 1997. Three-dimensional computation of flow around groyne. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 123(11): 963-970.
- Ranga Raju KG, Asawa GL, Mishra HK, (2000). Flow establishment length in rectangular Channels and ducts. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 126(7): 533-539.
- Rodi W, 1984. Turbulence models and their application in hydraulic, a state of the art view, Federal Republic of Germany, *University of Karlsruhe*.
- Salaheldin TM, Imran J, Chaudhry MH, (2004). Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 130(2): 91-100.
- Xuelin T, Xiang D, Zhicong C. (2006). Large eddy simulation of three dimensional flows around a super dike. *Journal of Tsinghua Science and Technology*, 11(1): 117-123.
- Yazdi J, Sarkardeh H, Azamatulla HMD, Ghani A. (2010). 3D simulation of flow around a single spur dike with free surface flow. *International Journal of River Basin Management*, 8(1): 55-62.
- Mahjoob, A., Kilanehei, F., (2020). Effects of the skew angle and road embankment length on the hydraulic performance of bridges on compound channels. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, Vol. 62 No 4, December, 44-54.
- Mayerle R, Toro FM, Wang SSY, (1995). Verification of a three-dimensional numerical model simulation of the flow in the vicinity of spur dikes. *Journal of Hydraulic Research*, 33(2): 243-256.
- McCoy A, Constantinescu G, Weber J, 2008. Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel with series of groynes. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 134(2): 157-172.
- Molinas A, Hafez YI, 2000. Finite element surface model for flow around vertical wall abutments. *Journal of Fluids and Structures*, 14: 711-733.
- Nakagawa H, Nezu I, Ueda H, (1975). Turbulence in open channel flow over smooth and rough beds. *Proc. of Japan Soc. Civil Eng.*, 241: 155-168.
- Namin MM, (2003). A fully three dimensional non hydrostatic free surface flow model for hydro environmental predictions. Ph.D. *Thesis, Cardiff School of Engineering*, Cardiff University.
- Namin MM, Lin B, Falconer RA, (2004). Modeling estuarine and coastal flows using an Unstructured triangular finite volume algorithm. *Journal of Advances in Water Resources*, 27: 1179-1197.
- Nezu I, Rodi W, (1986). Open channel flow measurement with a Laser Doppler Anemometer. *Journal of Hydraulic Engineering*. 112(5): 335-355.

Development of Three-Dimensional Numerical Flow Model with High Efficiency for Simulating the Flow around the Pier and Abutment of the Bridge

*Fouad Kilanehei, Associate Professor, Department of Civil Engineering,
Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.*

*Amir Mahjoob, Assistant Professor, Transportation Research Institute, Road,
Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran.*

*Seyed Taghi Omid Naeeni, Associate Professor, College of Engineering,
School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.*

*Masoud Montazeri Namin, Associate Professor, College of Engineering,
School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.*

E-mail: kilanehei@eng.ikiu.ac.ir

Received: August 2024- Accepted: December 2024

ABSTRACT

In this paper, a three-dimensional numerical model with high efficiency has been developed to simulate the flow around the pier and abutment of the bridge. Since the focus of the developed model is to simulate the flow around river bridges, therefore, in all the different parts of the developed model, the reduction of computational costs is considered while maintaining the necessary accuracy. To discretize the 3D computational domain in the horizontal plane, the unstructured triangular mesh has been used while in the vertical direction, use has been made of the structured grid. The 3D model implements the finite volume fractional step method to discretize the main equations. In the numerical model, the transport equation is solved in the horizontal plane using the explicit scheme while the implicit scheme is deployed in the vertical direction. The horizontal eddy viscosity is determined by Smagorinsky model and the vertical eddy viscosity is computed by 1D k- ϵ model. In the developed model, a hydrostatic pressure assumption is applied at the top layer cells. To evaluate the numerical model, the development of the three-dimensional boundary layer in the open channel has been investigated. The comparison of the results obtained from the modeling of the flow around a bridge pier and the bridge abutment with the laboratory results shows the appropriate accuracy and high efficiency of the developed three-dimensional model.

Keywords: 3D Flow Modeling, Finite Volume Method, Fractional Step Method, Unstructured Triangular Grid, River Bridges