

کاربرد روش اویلری- اویلری در تخمین حداکثر عمق آبشستگی موضعی

شمسا بصیرت^{۱*}، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۴	<p>آبشستگی موضعی در محل قرارگیری سازه‌های آبی تأثیر به‌سزایی در طراحی این سازه‌ها دارد. بنابراین شناخت رفتار جریان و تغییرات بستر تحت تأثیر حضور سازه‌های مختلف امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در این مقاله، یک مدل اویلری- اویلری سه‌بعدی برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفته است. با به- کارگیری نرم‌افزار منبع باز OpenFOAM^۳ و ایجاد قابلیت‌های مناسب مدل‌سازی آبشستگی، مدل مورد نظر ساخته شده و کارآیی و نقاط ضعف روش اویلری- اویلری مورد ارزیابی قرار گرفته است. شیوه عددی حجم محدود برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل حاکم بر انتقال رسوب و آبشستگی استفاده شده است. با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر میزان آبشستگی و استفاده از معادلات جریان دو فازی، به مدل‌سازی پدیده آبشستگی پرداخته شده است. برای تهیه مدل عددی، از حلگرهای جریان سیال در یک چارچوب تکرار سرعت- فشار، ضمنی قدرت‌مند توسعه داده شده در نرم‌افزار، استفاده شده است. برای صحت‌سنجی نتایج نهایی از نتایج تحقیقات آزمایشگاهی و عددی محققینی چون چاترجی و گوش، لیو و فن راین استفاده شده است. نتایج نشان‌دهنده دقت مناسب روش مورد استفاده در تخمین حداکثر عمق آبشستگی می‌باشد.</p>
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۱۲	
<p>واژگان کلیدی: آبشستگی، مدل‌سازی عددی، مدل اویلری- اویلری، OpenFOAM.</p>	

۱- مقدمه

مختلف و پیچیدگی رفتار رسوب، امکان استفاده از برداشت- های صحرائی به‌ندرت وجود داشته است. تا کنون انتقال رسوب و آبشستگی در سازه‌های مختلف هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته و مدل‌های عددی مختلفی برای مدل‌سازی این پدیده استفاده شده است. از جمله مدل‌های دوبعدی اجزای محدود مورد استفاده، FESWMS-2DH است که لارسن و همکاران [۱] از این مدل برای مدل‌سازی جریان در اطراف پایه‌های پل استفاده نموده‌اند. نتایج خروجی این مدل با نتایج به‌دست آمده از مدل HEC-RAS مقایسه شده است. ون‌بیک و ویند [۲] برای مدل‌سازی دوبعدی آبشستگی اطراف لوله‌ها از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استفاده نمودند. مدل‌سازی هیدرودینامیک جریان آشفتنه با استفاده از مدل عددی ODYSSEE انجام شده است. نیکولاس و والینگ [۳]

مسئله آبشستگی پایین‌دست سازه‌های آبی یکی از چالش- های بزرگ در طراحی این سازه‌ها می‌باشد. این مسئله، به علت تأثیر پارامترهای مختلف، از پیچیدگی خاصی برخوردار است. با توجه به شکل‌گیری جریان آشفتنه و تأثیر مستقیم آن بر مسئله و همچنین گستردگی مشخصات تأثیرگذار رسوب بر پدیده آبشستگی، امکان مدل‌سازی دقیق و مقرون به صرفه به سختی فراهم است. در طی سالیان گذشته، محققین با استفاده از مدل‌های دو و سه‌بعدی و روش‌های مختلف عددی، سعی در مدل‌سازی این مسئله نموده‌اند. برای ارزیابی صحت نتایج مدل‌های عددی، با رجوع به نتایج آزمایشگاهی قابل استناد، مدل‌ها مورد صحت‌سنجی قرار گرفته‌اند. به علت تأثیر پارامترهای

^۳ Open Field Operation And Manipulation

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: shamsa.basirat@srbiau.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران - آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد

اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

جریان در اطراف پایه استوانه‌ای، حداکثر عمق آبشستگی را تعیین می‌کند. کریسوهویدس و همکاران [۱۳] به مدل-سازی عددی و آزمایشگاهی آبشستگی تکیه‌گاه پل با دماغه نیم استوانه در یک کانال ساده پرداختند. مدل عددی مورد استفاده، روش حجم محدود سه‌بعدی با شبکه‌بندی نامنظم^۱ است. بهشتی و عطایی آشتیانی [۱۴] الگوی جریان سه‌بعدی را با استفاده از مدلهای SSIIM تحت شرایط آب صاف در اطراف گروه شمع ارائه داده‌اند. ساغروانی و همکاران [۱۵] به مدل‌سازی عددی گروه پایه پل پرداخته‌اند. مدل عددی ارائه شده در نرم‌افزار FLUENT با استفاده از مدل‌سازی معادلات حاکم به روش دو فازی اولرین ارائه شده است. دهقانی و همکاران [۱۶] به بررسی آزمایشگاهی برای مدل‌سازی تک‌پایه در کانال ساده می‌باشد. وو و لی [۱۷] مدل عددی دوبعدی برای مطالعه انتقال رسوب در کانال را مورد استفاده قرار داده‌اند. ایشان در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که فشار هیدرودینامیک در مدل ریاضی نمی‌تواند نادیده گرفته شود. خطای ایجاد شده در مدل آنها به دلیل تغییر مرز به صورت اتوماتیک برای مطالعه حرکت ذرات رسوبات کف می‌باشد. مدل، فشار را به دو صورت هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک مورد بررسی قرار داده است.

با توجه به اینکه پدیده آبشستگی در واقع در یک جریان سه‌بعدی اتفاق می‌افتد و فرض جریان یک و دوبعدی با مقادیر مشخصی از خطا همراه است، امروزه رویکرد مدل-سازی به سمت مدل‌های سه‌بعدی است. آلسن و ملائن [۸] به مدل‌سازی جریان در اطراف یک پایه استوانه‌ای با استفاده از روش حجم محدود و معادلات ناویر-استوک در حالت متوسط‌گیری زمانی رینولدز پرداخته‌اند. مدل سه-بعدی دائمی RANS، کوپله با مدل هیدرومورفودینامیک محاسبات جریان در اطراف پایه استوانه‌ای ارائه شده است. زراتی و جین [۹] و جزری‌زاده و زراتی [۱۰] در تحقیق خود به ارائه یک مدل عددی سه‌بعدی برای مطالعه مشخصات جریان در کانال‌های باز کم عمق پرداخته‌اند. ایشان برای مدل‌سازی از روش حجم محدود استفاده نموده و مدل به صورت شبه دوبعدی ارائه شده است. در این رابطه، دنگ و کای [۱۱] به بررسی روش‌های مختلف تخمین آبشستگی پل و کاهش آن پرداخته‌اند. آلسن و کیلسویگ [۱۲] یک مدل سه‌بعدی را ارائه نموده‌اند که با مدل‌سازی

مدلی را برای پیش‌بینی و تخمین میزان تغییرات بستر رودخانه و دشت سیلابی توسعه داده است. بیگری و استرم [۴] با ارائه‌ی یک مدل دوبعدی حجم محدود، با استفاده از روش عمق متوسط و مدل $k-\epsilon$ ، به بررسی عددی آبشستگی تکیه‌گاه پل در کانال مرکب پرداخته‌اند. لین و هاردی [۵] در مقاله خود به معرفی مدل عددی انتگرالی دوبعدی برای مدل‌سازی انتقال رسوب توسط جریان عبوری از یک ترانشه پرداخته است. چانگ و همکاران [۶] حل مسئله جریان دو فازی سیال و جامد با استفاده از روش تفاضلات محدود روی مختصات منحنی‌الخط را انجام دادند. نتایج نشان‌دهنده تطابق مناسب مدل ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی برای مدل‌سازی تک‌پایه در کانال ساده می‌باشد. وو و لی [۷] مدل عددی دوبعدی برای مطالعه انتقال رسوب در کانال را مورد استفاده قرار داده‌اند. ایشان در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که فشار هیدرودینامیک در مدل ریاضی نمی‌تواند نادیده گرفته شود. خطای ایجاد شده در مدل آنها به دلیل تغییر مرز به صورت اتوماتیک برای مطالعه حرکت ذرات رسوبات کف می‌باشد. مدل، فشار را به دو صورت هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک مورد بررسی قرار داده است.

با توجه به اینکه پدیده آبشستگی در واقع در یک جریان سه‌بعدی اتفاق می‌افتد و فرض جریان یک و دوبعدی با مقادیر مشخصی از خطا همراه است، امروزه رویکرد مدل-سازی به سمت مدل‌های سه‌بعدی است. آلسن و ملائن [۸] به مدل‌سازی جریان در اطراف یک پایه استوانه‌ای با استفاده از روش حجم محدود و معادلات ناویر-استوک در حالت متوسط‌گیری زمانی رینولدز پرداخته‌اند. مدل سه-بعدی دائمی RANS، کوپله با مدل هیدرومورفودینامیک محاسبات جریان در اطراف پایه استوانه‌ای ارائه شده است. زراتی و جین [۹] و جزری‌زاده و زراتی [۱۰] در تحقیق خود به ارائه یک مدل عددی سه‌بعدی برای مطالعه مشخصات جریان در کانال‌های باز کم عمق پرداخته‌اند. ایشان برای مدل‌سازی از روش حجم محدود استفاده نموده و مدل به صورت شبه دوبعدی ارائه شده است. در این رابطه، دنگ و کای [۱۱] به بررسی روش‌های مختلف تخمین آبشستگی پل و کاهش آن پرداخته‌اند. آلسن و کیلسویگ [۱۲] یک مدل سه‌بعدی را ارائه نموده‌اند که با مدل‌سازی

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار منبع باز^۲ OpenFOAM به مدل‌سازی پدیده آبشستگی پرداخته می‌شود. نرم‌افزار OpenFOAM یک جعبه ابزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که قادر به مدل‌سازی معادلات دیفرانسیل جزئی، از جمله حل عددی جریان سیال، از مسائل ساده تا پیچیده می‌باشد. OpenFOAM با تعدادی حلگر از پیش‌ساخته، کاربردها و کتابخانه‌های ارائه شده، می‌تواند به عنوان یک بسته شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گیرد. این نرم‌افزار تحت مجوز عمومی گنو^۳ ایجاد شده است. هسته انعطاف‌پذیر OpenFOAM از

³ GNU

¹ Non-staggered

² Open source

این موارد، برای مجموعه ذرات، رفتاری مشابه محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود و پارامترهایی که برای فاز سیال تعریف می‌شوند برای فاز رسوب نیز مطرح می‌شوند. سپس، معادلات مربوط به هر فاز جداگانه تحلیل می‌شوند و اندرکنش بین فازها از طریق جملات اضافی در معادلات بقای جرم و معادلات بقای اندازه حرکت منظور می‌شود. در صورتی که فقط تأثیر فاز سیال بر فاز رسوب در نظر گرفته شود، مدل کوپلینگ یکطرفه و در صورتی که اثر فاز سیال و رسوب بر یکدیگر در نظر گرفته شود، مدل کوپلینگ دوطرفه می‌باشد.

معادلات مورد استفاده همان معادلات بقای جرم و مومنت می‌باشند که برای هر دو فاز سیال و رسوب به صورت کاملاً مشابه مورد استفاده قرار می‌گیرند. روابط متوسط‌گیری شده زمانی به شکل زیر در مدل عددی به کار گرفته شده اند [۲۱]:

$$\frac{\partial \alpha_\phi \bar{U}_\phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_\phi \bar{U}_\phi \cdot \bar{U}_\phi) + \nabla \cdot (\alpha_\phi \bar{R}_\phi^{\text{eff}}) = -\frac{\alpha_\phi}{\rho_\phi} \nabla \bar{p} + \alpha_\phi \mathbf{g} + \frac{\bar{M}_\phi}{\rho_\phi} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \alpha_\phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{U}_\phi \alpha_\phi) = 0 \quad (2)$$

در روابط فوق، اندیس ϕ معرف دو فاز رسوب و سیال، α سهم فاز مورد بررسی، $\bar{R}_\phi^{\text{eff}}$ تنش رینولدز ناشی از آشفتگی و لزجت و \bar{M}_ϕ متوسط مومنت منتقل شده بین دو فاز، \bar{U}_ϕ بردار سرعت جریان برای هر فاز، \bar{U}_ϕ بردار سرعت متوسط، \bar{p} تبادل فشار بین دو فاز، ρ جرم مخصوص هر فاز، t پارامتر زمان و \mathbf{g} شتاب گرانش است.

رابطه (۳) در هر گام زمانی برای سهم هر فاز در معادلات باید برقرار باشد (S برای نمایش رسوب و f برای نمایش سیال آب استفاده می‌شود):

$$\alpha_f + \alpha_s = 1 \quad (3)$$

مطالعات دینامیک یک ذره در یک جریان سیال (شامل آب و رسوب) نشان داده‌اند که نیروهای موجود مؤثر بر حرکت ذره عبارتند از [۲۲]: گرادیان فشار ذرات جامد یا همان اندرکنش ذرات جامد بر یکدیگر، نیروی درگ ناشی از اختلاف سرعت بین دو فاز، نیروی لزجت و نیروی بدنه. بقیه نیروهای موجود مثل نیروی تاریخچه یا بست و جرم افزوده به دلیل ناچیز بودن، نادیده گرفته می‌شوند. با توجه به نیروهای عنوان شده، معادله مومنت برای دو فاز سیال و

مجموعه کدهای نوشته شده به زبان ++C ایجاد شده است. برای ساخت مدل و ایجاد ساختار مناسب، از حلگر TwoPhaseEulerFoam استفاده شده است. این حلگر مسئله جریان دو فازی را با استفاده از روش اویلری-اویلری حل می‌کند. برای مدل‌سازی اندرکنش بین فازها از چندین مدل مشهور استفاده می‌کند و برای مدل‌سازی جریان آشفتگی، قابلیت مدل‌سازی با انواع مدل‌های آشفتگی را دارا می‌باشد. مدل‌سازی پدیده آبشستگی با استفاده از مدل سه-بعدی انجام شده است. مدل سه‌بعدی با این فرض که دیواره‌ها به اندازه کافی از هم فاصله دارند تا تأثیر آنها بر جریان ناچیز باشد، به صورت دوبعدی در آمده است. برای مدل‌سازی معادلات حاکم بر جریان چندفازی از روش اویلری-اویلری استفاده شده است. برای مدل‌سازی جریان آشفتگی از روش $k-\epsilon$ استاندارد استفاده شده است.

از جمله جریان‌هایی که در آن انتقال رسوب و تغییرات بستر مطرح می‌باشد، خروجی از سازه که منجر به آبشستگی بستر پایین دست می‌گردد، جریان عبوری از روی ترانشه می‌باشد. در بسیاری از تحقیقات گذشته، برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌های معرفی شده، مسئله تغییر شکل ترانشه فرسایش‌پذیر در مسیر جریان مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق نیز برای اعتبارسنجی و بررسی رفتار مدل اویلری-اویلری مورد استفاده، مسئله تغییر شکل ترانشه که توسط فن راین [۲۰] مورد بررسی قرار گرفته است، استفاده گردید.

۲-۱- روابط حاکم و حل عددی

در این تحقیق، با استفاده از روش اویلری-اویلری به مدل‌سازی پدیده آبشستگی پرداخته شده است. در این روش، هر دو فاز به مانند محیطی که فازی در فاز دیگر نفوذ می‌کند، در نظر گرفته می‌شوند. در این روش، معادلات حاکم بر هر دو فاز کاملاً مشابه هم هستند. مدل‌های اویلری-اویلری که نسبت به مدل‌های اویلری-لاگرانژی به‌طور وسیع‌تری مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به دو صورت مطرح می‌شوند. زمانی که سرعت فاز سیال و جامد با یکدیگر برابر باشد، جریان مخلوط دوفازه به‌صورت یک جریان تک‌فازه با خصوصیات اصلاح شده تحلیل می‌شود. در برخی از موارد نیز سرعت فاز جامد و سیال برابر نیست که می‌تواند ناشی از گرادیان سرعت در میدان جریان، آشفتگی و یا نیروهای کالبدی وارد بر فاز جامد باشد. در

است. در این آزمایش‌ها، میدان جریان وانتقال رسوب روی ترانسه فرسایش‌پذیر مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۱)، ساختار آزمایش‌ها به صورت شماتیک نشان داده شده است. جریان یکنواخت ورودی به کانال از روی ترانسه عبور می‌کند و با گذشت زمان منجر به تغییر شکل ترانسه خواهد شد. در مدل فن راین، برای جلوگیری از فرسایش بستر قبل از ترانسه، حجم کمی از رسوبات در بالادست تزریق می‌گردد.

در مدل عددی ساخته شده، همین حجم رسوب، همراه با جریان ورودی در محل بالادست، وارد کانال می‌گردد. اطلاعات کامل آزمایش‌ها را می‌توان در مقالات اصلی (فن راین [۲۰]) مشاهده نمود.

مصلح بستر از نوع ماسه با $d_{50} = 0.16 \text{ mm}$ و وزن مخصوص نسبی غوطه‌وری $1/56$ و تخلخل 0.43 می‌باشد. شرایط جریان برای این اجرا به قرار زیر است: طول بستر قبل از ترانسه ۲ متر و سرعت جریان ورودی 0.51 متر بر ثانیه می‌باشد. عمق جریان در طول کانال یکنواخت و برابر با 0.39 متر ثابت باقیمانده است. در آزمایش‌ها، سرعت جریان ورودی با استفاده از اختلاف تراز آب در بالادست و پایین‌دست ایجاد شده است. اما در شبیه‌سازی‌ها، شرایط جریان بالادست به صورت یک جریان با ورودی یکنواخت مدل‌سازی شده است.

در مدل عددی اویلری- اویلری ارائه شده در این تحقیق، برای شبکه‌بندی دامنه حل، از سلول‌های مستطیلی یکنواخت استفاده شده است. دامنه حل به شبکه‌های یک سانتی‌متری تقسیم شده است. برای مدل‌سازی بستر، با تعریف فاز دوم به عنوان رسوبات و تخصیص بلوک‌های مشخص در فایل `setFieldsDict` بستر فرسایش‌پذیر تعریف شد و مشخصات بستر در فایل `transportProperties` تعریف شده است. در شکل (۲)، شبکه‌ی ایجاد شده و محدوده مربوط به بستر فرسایش‌پذیر ارائه شده است.

رسوب به قرار زیر خواهد بود [۲۱]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) = -\alpha_f \nabla P + \nabla \cdot \vec{\tau}_f + \alpha_f \rho_f \vec{g} + K_{sf} (\vec{v}_s - \vec{v}_f) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla P - \nabla P_s + \nabla \cdot \vec{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + K_{fs} (\vec{v}_f - \vec{v}_s) \quad (5)$$

در روابط فوق، \vec{v}_f و \vec{v}_s به ترتیب سرعت متوسط جریان سیال و رسوب، P فشار مشترک بین دو فاز، \vec{g} بردار شتاب گرانش و $\vec{\tau}_s$ تانسور تنش در فاز جامد می‌باشد. $K_{sf} = K_{fs}$ ضریب تغییرات مومنتم بین فازی می‌باشد که تابعی از ضریب درگ (C_D) است و برای تعیین نیروی درگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تعیین روابط حاکم بر میزان نیروهای مذکور، روش‌های مختلفی توسط محققین پیشنهاد شده که مبنای استفاده از این روابط عدد رینولدز جریان و اندازه رسوبات عنوان شده است.

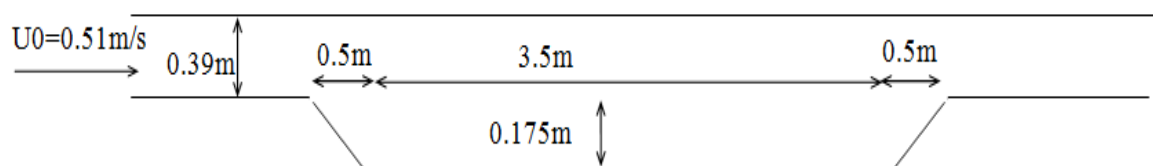
یکی از مسائل مهم در مسائل انتقال رسوب، تعیین سرعت سقوط رسوبات است. سرعت سقوط رسوب در جریان بستگی به پارامترهایی همچون چگالی رسوب، شکل ذرات رسوب، چگالی و لزجت سیال دارد.

برای حل عددی معادلات حاکم، با استفاده از روش حجم محدود، از حلگر `TowPhaseEulerFoam` از مجموعه حلگرهای جریان چندفازی در نرم‌افزار `OpenFOAM` استفاده شده است. در این حلگر، برای گسسته‌سازی میدان زمان از روش اویلری و برای گسسته‌سازی پارامتر سرعت از روش گوسی خطی استفاده شده است. در این حلگر، روابط جریان دو فازی فوق با استفاده از تئوری انرژی سینماتیک بیان شده توسط گیداسپو [۲۱] توسعه داده شده است.

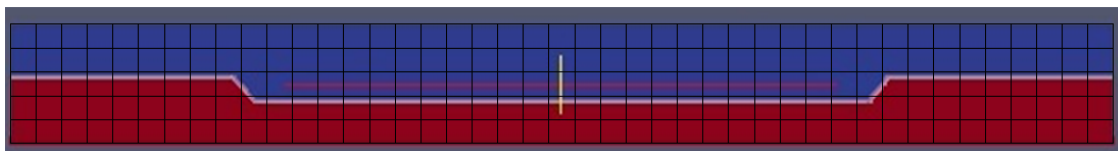
۳- اعتبارسنجی مدل عددی

۳-۱- مشخصات مسئله مورد بررسی

نتایج آزمایش‌های آبشستگی ترانسه فرسایش‌پذیر فن راین [۲۰] برای اعتباریابی نتایج مدل عددی استفاده شده

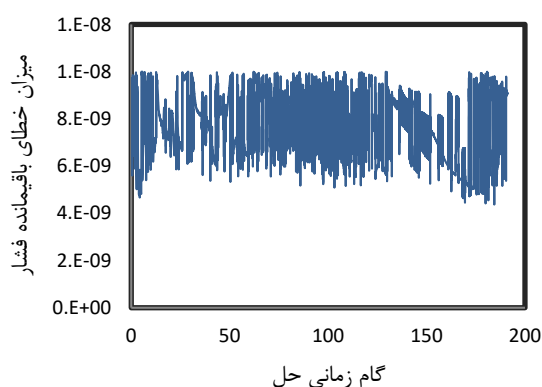


شکل ۱: نمایی شماتیک از ساختار مدل آزمایشگاهی فن راین [۲۰]



شکل ۲: شرایط ابتدایی بستر و شبکه بندی دامنه حل

جریان و پروفیل آبشستگی، شبیه سازی به صورت دوبعدی انجام شده است. با شروع جریان ورودی، آب وارد دامنه حل می شود. با عبور آب از روی بستر مصالح، بستر به مرور جابه جا می شود. در شکل (۶)، تغییرات شکل ترانشه با گذشت زمان مشاهده می شود.



شکل ۴: خطای باقیمانده فشار با استفاده از روش حاضر

بعد از گذشت حدود ۱۰ ساعت از اجرای مدل، سطح بستر تقریباً به موقعیت ثابت می رسد. در این شرایط تعادل، تغییرات سطح بستر تقریباً صفر است. همچنین همانطور که در شکل (۶) قابل مشاهده است، در زمان های نزدیک به شروع جریان آب، تغییرات بستر شدیدتر است و هر چه زمان بیشتری سپری می گردد، این تغییرات آهسته تر اتفاق می افتد که این رفتار کاملاً مطابق با اصول حاکم بر تغییرات زمانی پدیده آبشستگی می باشد.

۴- کاربرد مدل عددی

۴-۱- تشریح مسئله مورد بررسی

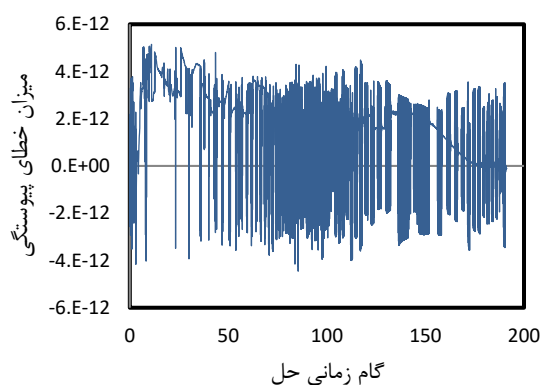
نتایج آزمایش های آبشستگی جت دیواره ای توسط ليو [۱۸] و چاترجی و گوش [۱۷] برای صحت سنجی نتایج مدل مورد استفاده در این تحقیق به کار گرفته شده است. در این آزمایش ها، میدان جریان وانتقال رسوب بر اثر جت مستغرق مورد بررسی قرار گرفته است. ساختار آزمایش هابه صورت شماتیک در شکل (۷) نشان داده شده است. با استفاده از یک بازشدگی کوچک در زیر یک دریچه کشویی، جریان

۳-۲- نتایج اجرای مدل و تحلیل خروجی ها

در این مثال، پارامتر مورد نظر، شکل بستر پس از اتمام زمان آزمایش ها و به عبارتی زمان رسیدن به عمق تعادل آبشستگی، یا همان حداکثر عمق آبشستگی، می باشد.

در نرم افزار OpenFOAM، برای بررسی همگرایی حل، از سه معیار باقیمانده ها، عدم تغییر حل با وجود تکرارهای بیشتر و خطا در محاسبه معادله پیوستگی استفاده می شود. در تحلیل انجام شده نیز این سه معیار مورد ارزیابی قرار گرفته اند. شکل (۳) خطای معادله پیوستگی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، مقدار این خطا کمتر از $5e-12$ می باشد.

خطای باقیمانده فشار در شکل (۴) نشان داده شده که دارای روند کاهشی است و نشان دهنده همگرا بودن حل عددی می باشد. نتایج خروجی این تحقیق در مقایسه با نتایج فن رایین [۲۰] در شکل (۵) نشان داده شده است



شکل ۳: خطای پیوستگی برای کنترل همگرایی حل

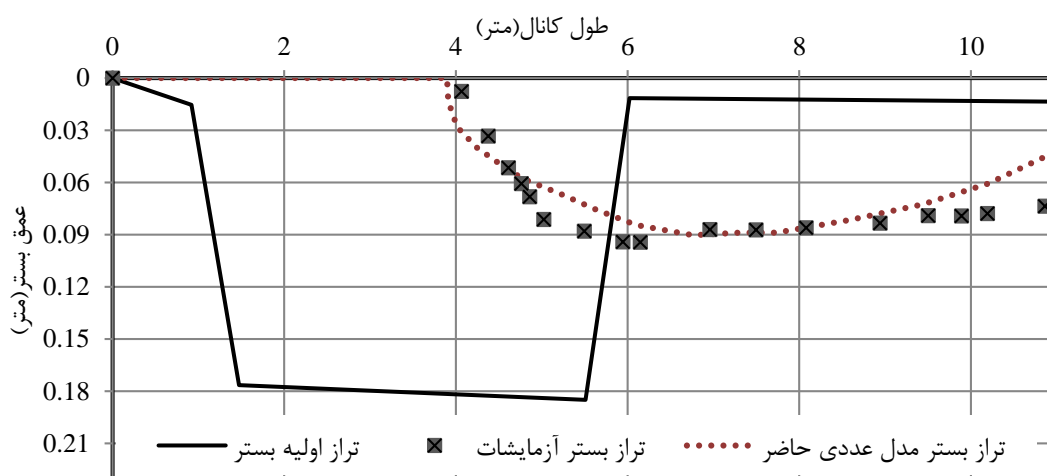
همانطور که در شکل (۵) مشاهده می شود، پروفیل بستر به دست آمده از مدل عددی ارائه شده در این مقاله بعد از گذشت ۱۵ ساعت از زمان اجرای مدل با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد و نتایج نزدیک به مقادیر به دست آمده توسط مدل عددی ارائه شده توسط فن رایین و نتایج آزمایشگاهی می باشد.

مدل مورد استفاده در واقع یک مدل سه بعدی است. اما با چشم پوشی از تأثیر ناچیز دیواره های فلوم بر منطقه اصلی

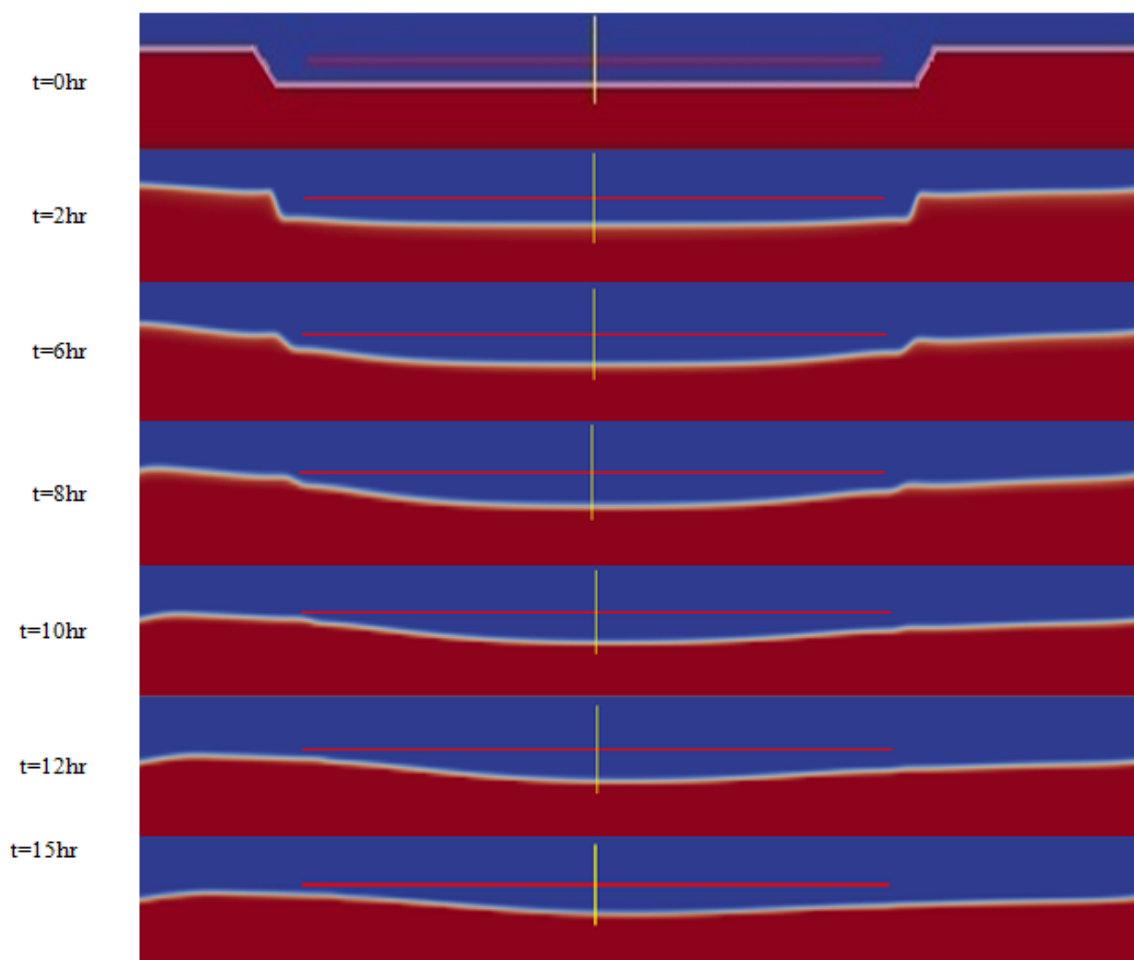
مشاهده نمود، اجرای ۲ از آزمایش‌ها به عنوان نمونه شبیه-

سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

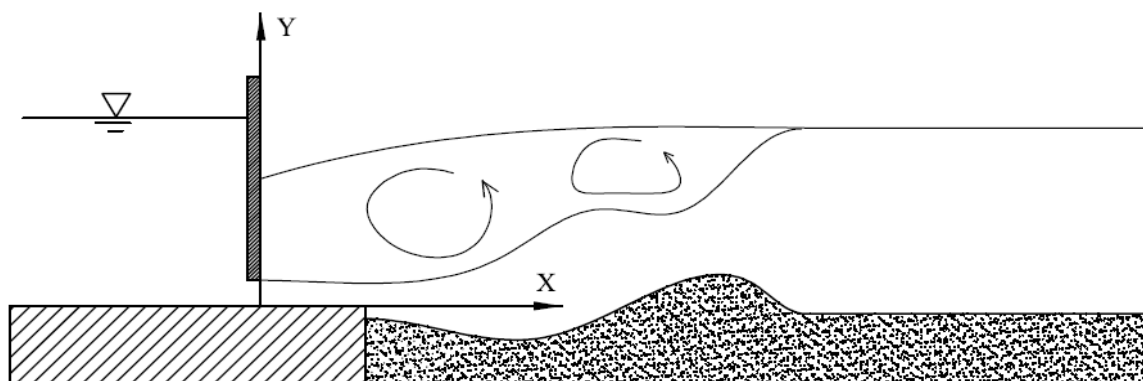
از روی بستر صلب به سمت بستر فرسایش‌پذیر ایجاد شده است. اطلاعات کامل آزمایش‌ها را در مقالات اصلی می‌توان



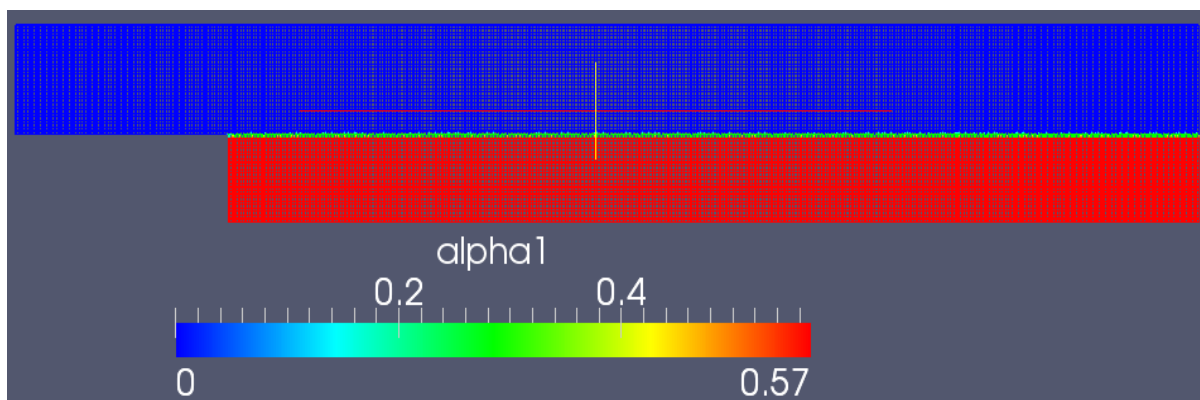
شکل ۵: تغییرات بستر بعد از گذشت ۱۵ ساعت



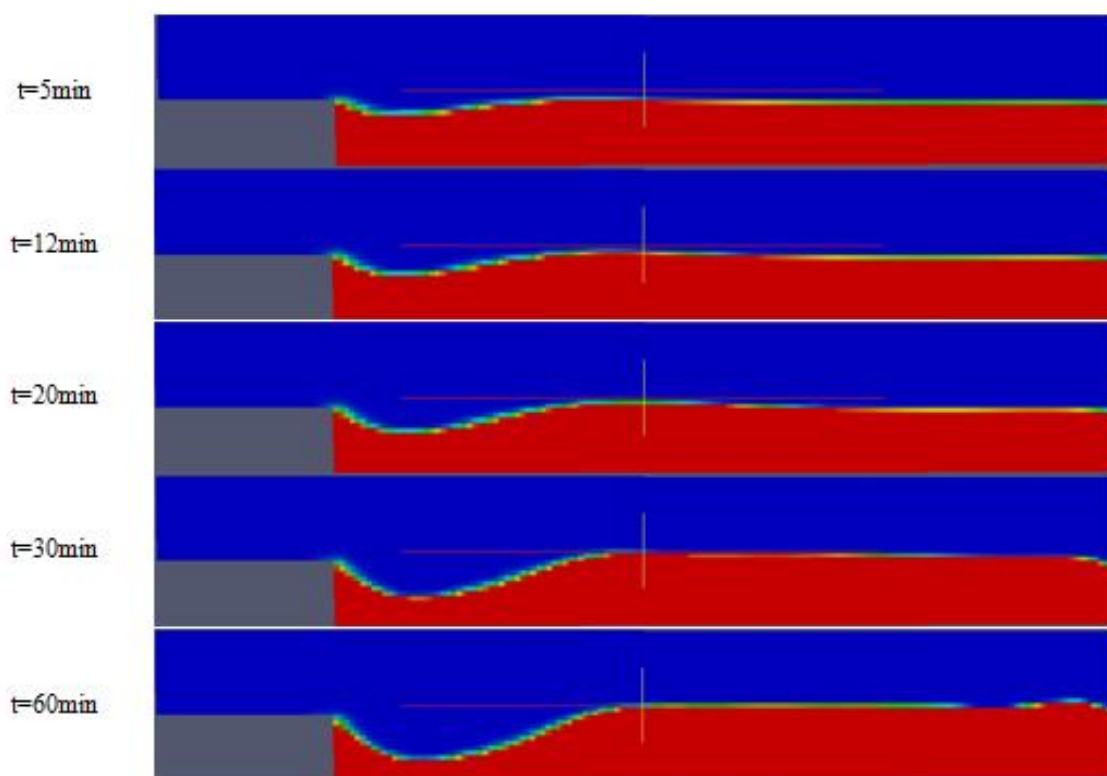
شکل ۶: تغییرات پروفیل بستر با گذشت زمان



شکل ۷: نمایی شماتیک از هندسه مسئله جت مستغرق



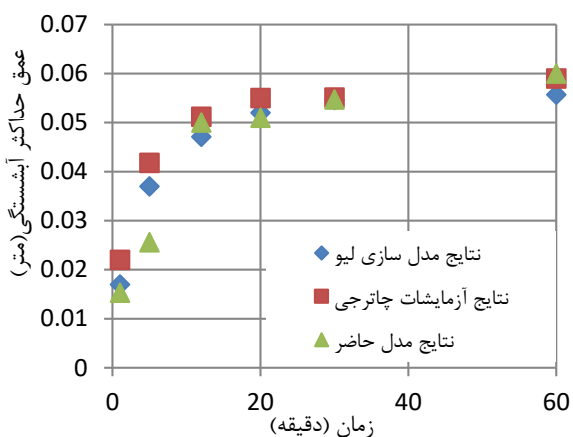
شکل ۸: شبکه بندی دامنه حل و تعریف بستر فرسایش پذیر بعد از بستر صلب



شکل ۹: تغییرات زمانی پروفیل بستر و تشکیل حفره آبستگي

در این تحقیق، هدف بررسی عمق حداکثر آبهستگی تخمین زده شده با استفاده از روش عددی اوپلری- اوپلری می باشد. به همین دلیل، تغییرات پروفیل بستر با گذر زمان مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۹)، تغییرات زمانی پروفیل بستر با زمان مشاهده می شود.

در مسئله آبهستگی پایین دست سازه های آبی، مهم ترین مسئله، حداکثر عمق آبهستگی است. در شکل (۱۰)، مقدار تخمین زده شده با روش اوپلری- اوپلری تحقیق حاضر، روش اوپلری- لاگرانژی لیو [۱۸] و نتایج آزمایش های چاترجی و گوش [۱۷] مورد مقایسه قرار گرفته اند. همانطور که مشاهده می شود، مدل اوپلری- اوپلری با دقت مناسب میزان آبهستگی را تخمین زده است. همانطور که در شکل (۱۰) مشاهده می شود با وجودی که مدل اوپلری مورد استفاده در این تحقیق مقدار حداکثر عمق آبهستگی را به خوبی تخمین می زند، اما در تخمین شکل تل آبهستگی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مقادیر مناسبی را در بر ندارد. این مسئله مربوط به رفتار مدل در هنگام فرونشست رسوبات بعد از حفره آبهستگی می باشد.



شکل ۱۰: تغییرات زمانی حداکثر عمق آبهستگی تخمین زده شده با روش حاضر و مقایسه با نتایج مدل عددی لیو (۱۸) و آزمایش های چاترجی و گوش (۱۷)

۵- جمع بندی

با توجه به نتایج به دست آمده از مدل سازی پدیده آبهستگی در پایین دست جت خروجی از دریچه و مقایسه مقادیر حداکثر عمق آبهستگی با نتایج آزمایش ها و مدل سازی های سایر محققین، مشاهده می شود که مدل ارائه شده در این تحقیق، برای تخمین حداکثر عمق آبهستگی، رفتار مناسبی را نشان داده است. اما نتایج خروجی در تخمین

مصالح بستر از نوع ماسه با $d_{50} = 0.23mm$ ، وزن مخصوص نسبی 1.56 ، تخلخل 0.33 و زاویه اصطکاک 29 درجه می باشد. شرایط جریان برای این اجرا عبارتند از: طول بستر فرسایش ناپذیر 2 متر و سرعت جریان ورودی جت 0.67 متر بر ثانیه. عمق جریان در پایین دست به وسیله سرریز خروجی 0.25 متر ثابت باقیمانده است.

در آزمایش ها، سرعت جریان ورودی با استفاده از اختلاف تراز آب در بالادست و پایین دست ایجاد شده است. اما در شبیه سازی ها، شرایط جریان بالادست جت مدل سازی نشده به طور مشابه سرعت جت در محل ورودی و در دیواره سمت چپ جریان یکنواخت وارد کانال شده است. برای شبکه بندی دامنه حل، از شبکه ساختار یافته مستطیلی استفاده شده است. اندازه المان ها به 0.01 متر محدود شده و گام زمانی برای حل 0.001 ثانیه لحاظ شده است. شبکه ایجاد شده برای مدل در شکل (۸) نشان داده شده است.

در شکل (۸)، شبکه بندی دامنه حل و همچنین محل قرارگیری رسوبات نشان داده شده است. مقادیر α_1 نشان دهنده مقدار سهم فاز رسوب در نقاط مختلف دامنه حل مسئله می باشد.

۴-۲- تحلیل نتایج

مدل مورد استفاده در واقع یک مدل سه بعدی است. اما با چشم پوشی از تأثیر ناچیز دیواره های فلوم بر منطقه اصلی جریان و پروفیل آبهستگی، شبیه سازی به صورت دوبعدی انجام شده است. با شروع جریان، موج های آب وارد دامنه حل می شوند. بعد از اینکه جریان آرام شد، سطح آب به موقعیت ثابت می رسد. در این شرایط تعادل، سطح آب کاملاً صاف است و فقط در محل شکل گیری حفره کمی موج خواهد بود.

در مدل عددی اوپلری- لاگرانژی لیو [۱۸] در محدوده پایین دست جریان، پخش مومنتم بیش از مقدار آزمایشگاهی به دست آمده است. همچنین، توزیع سرعت در جهت افقی یکنواخت تر به دست آمده است.

جریان جت دیواره ای به دو ناحیه تقسیم می شود. یک ناحیه در داخل محدوده لایه مرزی و دیگری محدوده لایه برشی. وقتی لایه برشی به لایه مرزی می رسد، هسته پتانسیل ناپدید می شود و جریان جت به طور کامل توسعه می یابد.

توجه به هزینه کم‌کاربرد آن، و در دسترس بودن، نسبت به نرم افزارهای موجود دیگر ارجحیت پیدا کرده است. با توجه به رفتار مدل اوپلری- اوپلری مورد استفاده در این تحقیق، امکان استفاده از این مدل برای بررسی مسائل مختلف آبشستگی امکان‌پذیر می‌باشد و پیشنهاد می‌گردد که با توجه به سرعت اجرا و دقت مناسب آن، در تحقیقات آتی، از این مدل برای بررسی آبشستگی در پایین‌دست جت خروجی از دریچه و همچنین در جریان‌های سه‌بعدی در اطراف پایه و تکیه‌گاه‌ها، استفاده شود.

محل آبشستگی، شکل پروفیل حفره و تشکیل تل پایین- دست رفتار مناسبی را در برداشته است. از مزایا و نقاط مثبت مدل اوپلری- اوپلری مورد استفاده می‌توان به حل معادلات مشابه برای فاز رسوب و سیال و عدم نیاز به حل معادلات متفاوت اشاره کرد. همچنین، با استفاده از شبکه‌بندی دامنه حل با یک شبکه ثابت، نتایج با دقت نسبتاً مناسبی به دست آمده است. مدل عددی اوپلری- اوپلری که بر مبنای نرم‌افزار OpenFOAM ارائه شده، یک مدل مناسب برای مدل- سازی پدیده آبشستگی در مسائل سه‌بعدی می‌باشد که با

۶- مراجع

- [1] R. J. Larsen, C. F. Ting, and A. L. Jones, "Flow velocity and pier scour prediction in a compound channel: big Sioux river bridge at Flandreau, south Dakota", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 137, NO. 5, Oct 2010, pp. 595 – 605.
- [2] F. A. Van Beek, and H. G. Wind, "Numerical modeling of erosion and sedimentation around offshore pipelines", *Coastal engineering*, Vol. 14, NO. 2, Apr 1990, pp. 107 – 128.
- [3] A. P. Nicholas, and D. E. Walling, "Investigating spatial patterns of medium-term overbank sedimentation on floodplains: a combined numerical modelling and radiocaesium-based approach", *Geomorphology*, Vol. 19, NO. 1-2, May 1997, pp. 133 – 150.
- [4] B. Biglari, and T. W. Sturm, "Numerical modeling of flow around bridge abutments in compound channel", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, NO. 2, Feb 1998, pp. 156 – 164.
- [5] S. N. Lane, R. Hardy, R. J. Elliott and D. B. Ingham, "Numerical modeling of flow processes over gravelly surfaces using structured grids and a numerical porosity treatment", *Water Resources Research*, Vol. 40, NO. 1, Jan 2004, pp. 1 – 18.
- [6] H. R. Chung, T. Y. Hsieh, and J. C. Yang, "Two dimensional shallow-water flow model with immersed boundary method", *Computers & Fluids*, Vol. 51, NO. 1, Dec 2011, pp. 145 – 156.
- [7] T. Wu, and X. X. Li, "Vertical 2-D mathematical model of sediment silting in dredged channel", *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, Vol. 22, NO. 5, Oct 2010, pp. 628 – 632.
- [8] N. R. Olsen, and M. C. Melaaen, "Three-dimensional calculation of scour around cylinders", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, NO. 9, Sep 1993, pp. 1048 – 1054.
- [9] A. R. Zarrati and Y. C. Jin, "Development of a generalized multi-layer model for 3-D simulation of free surface flows", *International journal for numerical methods in fluids*, Vol. 46, NO. 10, Dec 2004, pp. 1049 – 1067.
- [۱۰] فرج جزئی زاده و امیررضا زراتی، "توسعه یک مدل عددی سه‌بعدی آبهای کم عمق برای جریانهای سطح آزاد"، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، کرمان، ایران، آبان، ۱۳۸۴.
- [11] L. Deng, and C. S. Cai, "Bridge scour: Prediction, modeling, monitoring, and countermeasures", *Practice periodical on structural design and construction*, Vol. 15, NO. 2, Jul 2009, pp. 125 – 134.
- [12] N. Olsen, and H. M. Kjellesvig, "Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of maximum local scour depth", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 36, NO. 4, Jul 1998, pp. 579 – 590.
- [13] A. Chrisohoides, F. Sotiropoulos, and T. W. Sturm, "Coherent structures in flat-bed abutment flow: Computational fluid dynamics simulations and experiments", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, NO. 3, Mar 2003, pp. 177 – 186.
- [۱۴] علی اصغر بهشتی و هزاد عطائی آشتیانی، "بررسی عددی الگوی جریان و آبشستگی در اطراف گروه شمع"، هارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، ایران، اردیبهشت، دوره ۵، ۱۳۸۷.
- [۱۵] سیدفضل اله ساغروانی، امیر اظهري، محمد علیزاده و بايرامعلی محمدنژاد، "مدل سازی عددی آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه پل با مقطع دایره ای"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران، ایران، آبان، ۱۳۸۹.

- [16] A. A. Dehghani, H. Bashiri, and N. Dehghani, "Downstream scour of combined flow over weirs and below gates", *River Flow*—Dittrich, Koll, Aberle & Geisenhainer (eds).
- [17] S. S. Chatterjee, S. N. Ghosh, and M. Chatterjee, "Local scour due to submerged horizontal jet", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 120, NO. 8, Aug 1994, pp. 973 – 992.
- [18] X. Liu, "Numerical models for scour and liquefaction around object under currents and waves", University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [۱۹] حسین حمیدی فر، محمد حسین امید و محسن نصرآبادی، "آبستگي موضعی بستر در پایین دست دریچه کشویی"، مجله آب و خاک، دوره ۲۴، شماره ۴، دی ۱۳۸۹، صفحه ۷۲۸-۷۳۶.
- [20] L. C. van Rijn, *Mathematical models for sediment concentration profiles in steady flow*, Delft Hydraulics Laboratory, 1986.
- [21] D. Gidaspow, *Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions*, Academic press, 1994.
- [22] A. Prosperetti, G. Tryggvason, *Computational methods for multiphase flow*, Cambridge university press, 2009.