

مقایسه مدل‌های عددی سه‌بعدی شبیه‌سازی جریان و رسوب

امیر محجوب*، استادیار، پژوهشگر حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
فواد کیلانه‌ئی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)،
قزوین، ایران

سید محمد منصورزاده، مربی، پژوهشگر حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.mahjoob@bhrc.ac.ir

دریافت: ۹۶/۱۰/۰۸ - پذیرش: ۹۷/۰۴/۲۰

صفحه ۴۶-۳۵

چکیده

بررسی پدیده‌های هیدرولیکی رودخانه‌ها با استفاده از مدل‌های عددی تجاری بسیار رواج یافته است. در این میان استفاده از مدل‌های سه‌بعدی با توجه به پیشرفت تکنولوژی از محبوبیت بیشتری برخوردار است. اطلاعات بسیار گسترده‌ای از مدل‌های سه‌بعدی قابل استحصال است لیکن دانش فنی مورد نیاز برای استفاده از آن‌ها بسیار بیشتر از مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی است. در این مقاله ضمن ارائه کلی مدل‌های تجاری سه‌بعدی معتبر به بررسی معیارهای مهم انتخاب مدل مناسب برای شبیه‌سازی‌های مختلف پرداخته شده است. از میان مدل‌های عددی سه‌بعدی که توانایی شبیه‌سازی جریان و رسوب را به صورت همزمان دارا باشند، مدل FLOW3D به عنوان مدل مناسب پیشنهاد شده است. این مدل دارای مرجع علمی و راهنمای مناسبی است و مثال‌های متعددی در آن وجود دارد. رابط گرافیکی قدرتمند، کاربر دوست بودن، اطلاعات خروجی مناسب و به شکل مطلوب از دیگر مزایای این مدل است. استفاده از این نرم‌افزار در هیدرولیک، رسوب کانال‌های باز در جریان‌های موضعی و جریان اطراف پایه پل‌ها پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی عددی، جریان در رودخانه، مطالعات رسوب، نرم‌افزار تجاری، معادلات بقا

۱- مقدمه

شبیه‌سازی جریان در محیط‌های مذکور بوده‌اند. روابط تحلیلی، اجرای آزمونهای آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی ابزارهایی هستند که جهت شبیه‌سازی جریان سیالات مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به هندسه پیچیده محیط‌های آبی، استفاده از روش‌های تحلیلی جهت پیش‌بینی میدان جریان در مسائل کاربردی به ندرت مورد استفاده قرار گرفته و عمدتاً در شرایط بسیار خاص امکان‌پذیر است. آزمونهای آزمایشگاهی نیز علاوه بر اینکه با خطاهای تغییر مقیاس و اندازه‌گیری

آشنایی و شناخت رفتار جریان در طبیعت مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و دریاها به دلیل ایفای نقش اساسی در انتقال و تأمین منابع آبی از اهمیت خاصی برخوردار است. به عنوان مثال تأثیر سیلاب بر مسیر راه و ابنیه فنی آن (پل، آبرو و ...) از اهمیت زیادی برخوردار است تا آنجا که عدم شناخت کافی و دقیق می‌تواند منجر به خسارات زیاد مالی و جانی گردد. با توجه به ضرورت شناخت پدیده‌های حاکم بر محیط‌های آبی، محققین همواره نیازمند ابزاری جهت

مطالعات مختلفی از آن‌ها استفاده شده است. نکته قابل ذکر اینست که استفاده از مدل‌های سه‌بعدی در مواردی پیشنهاد می‌گردد که بررسی موضعی پدیده‌ای خاص مدنظر باشد زیرا استفاده از این مدل‌ها در مسیرهای طولانی و با تعداد المان‌های زیاد بسیار زمان‌بر خواهد بود و گاهی ممکن است با مشکلات عددی نظیر نوسان در نتایج یا عدم همگرایی در نتایج مواجه گردند و سبب افزایش هزینه‌های محاسباتی شود. البته گاهی می‌توان با استفاده از مفاهیمی نظیر تقارن، قسمت‌های زیادی از میدان محاسباتی را حذف کرد و به شدت مدت زمان محاسبات کاهش می‌یابد. در ادامه به برخی از موارد استفاده شده از مدل‌های سه‌بعدی اشاره می‌گردد.

از مدل سه‌بعدی FLOW3D در مطالعات مختلفی استفاده شده است. جوادیان و همکارانش با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D به شبیه‌سازی جریان در قوس تند ۹۰ درجه پرداختند. سپس با افزودن دیوار میانی در آن، مجدداً شبیه‌سازی صورت گرفت. از معادلات حاکم بر حرکت سیال تراکم‌ناپذیر لزج و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ (RNG) استفاده شد. سطح آزاد نیز با روش جزء حجم سیال (VOF) مدل‌سازی شد. سپس نتایج هر دو مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی انجام شده صحت‌سنجی گردید. نتایج بیان‌گر انطباق خوب مدل‌های عددی با آزمایشگاهی بود (جوادیان و همکاران، ۱۳۹۵). در تحقیقی دیگری مساله آبشستگی در پایه پل‌ها به عنوان یکی از مسائل مهم در علم مهندسی رودخانه و مهندسی سواحل بررسی شده است. به کمک یک مدل فیزیکی که مشخصات و نتایج آن قابل دسترسی بوده یک مدل عددی با نرم‌افزار Flow3D شبیه‌سازی شده است و پارامترهای هیدرولیکی و آبشستگی پایه پل دایره‌ای در آن صحت‌سنجی و خطای بین مدل فیزیکی و عددی تعیین گردیده است. در مطالعه مدل فیزیکی، شکل مقطع پایه‌ای پل دایره‌ای، فاصله بین پایه‌ها با نسبت قطر پایه‌ها متغیر و سرعت متوسط جریان ورودی

همراه هستند، به دلیل هزینه‌های بالا و زمان‌بر بودن دارای کاربرد محدودی می‌باشند. با پیشرفت تکنولوژی و علوم کامپیوتر، استفاده از مدل‌های عددی به عنوان ابزاری قوی در حل معادلات پیچیده، رشد روزافزونی یافته است. تکنیک‌ها و روش‌های عددی نیز با افزایش قدرت محاسبه رایانه‌ها پیشرفت فوق‌العاده‌ای داشته‌اند. در سال‌های اخیر نرم‌افزارهای تجاری متعددی به منظور شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرودینامیکی معرفی شده‌اند. استفاده از نرم‌افزارهای تجاری به عنوان یک ابزار نیرومند جهت مدل‌سازی جریان در مقیاس‌های واقعی، کمک شایانی به مهندسين نموده است. برخلاف شبیه‌سازی فیزیکی، شرایط جریان و ابعاد و اندازه هندسه جریان در شبیه‌سازی عددی به راحتی قابل تغییرند. با این وجود جنبه‌های منفی نیز برای این مسئله وجود دارد که از آن جمله می‌توان به امکان استفاده از پیچیده‌ترین ابزارهای محاسباتی برای کاربران بدون تخصص لازم و احتمال بروز خطا و اشتباه به واسطه عدم معرفی مناسب محدودیت‌ها اشاره کرد (Lomax and Pulliam, 1999).

از طرف دیگر رفتارهای جریان سیال به کمک قوانین و معادلات بقای جرم و اندازه حرکت مورد مطالعه و ارزیابی قرار می‌گیرند. به منظور تعیین شرایط جریان علاوه بر معادلات مذکور به اطلاعات هندسی منطقه مورد مطالعه و ویژگی‌های سیال (مانند ویسکوزیته) و خصوصیات کانال (مانند زبری بستر) احتیاج است. اطلاعات هیدرودینامیکی مرزها نیز از دیگر اطلاعات مورد نیاز جهت تجزیه و تحلیل رفتارهای جریان است. بررسی رفتار جریان با استفاده از حل معادلات حاکم بر آن منجر به تعیین پارامترهایی نظیر سرعت و عمق آب در نقاط مختلف می‌گردد. برای بررسی جریان با سطح آزاد در حالت سه‌بعدی نرم‌افزارهای مختلف کامپیوتری نظیر Flow-3D، MIKE 3، FLUENT، و SSIM و ... تهیه شده‌اند که هر یک توانایی و قابلیت مخصوص به خود را دارند و در

آزمایشگاهی فلوم دانشگاه تربیت مدرس صحت سنجی شده است. نتایج حاصله نشان داد با افزایش ضخامت ابعادگردابه‌های ایجادشده بعد از آبشکن کاهش یافته و ابعادتنش برشی بالا با افزایش ضخامت افزایش می‌یابد اما تاثیری چندانی برکانتورهای سرعت ندارد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۳). در کاربرد دیگری از این مدل، عملکرد انواع مدل‌های آشفستگی در یک کانال U شکل با یکدیگر مقایسه شده است (فرقان‌پرست و محمدی، ۱۳۹۳).

در ادامه ضمن بررسی معادلات حاکم بر جریان در مدل‌های سه‌بعدی، مروری کلی بر تعدادی از این مدل‌ها انجام گشته و در نهایت با توجه به معیارهای در نظر گرفته شده برای برتری مدل‌ها نسبت به یکدیگر به بررسی دقیق‌تر مدل منتخب پرداخته شده است.

۲- فرم کلی معادلات بقاء

۲-۱- قانون بقای کمیت‌های اسکالر

معادلات بقاء در جریان سیالات بیان می‌کند که تغییرات زمانی و مکانی کمیت‌های جریان در یک حجم کنترل دلخواه، در اثر توزیع کمیت بوسیله منابع (چشمه و چاه) داخلی و سطحی و مقدار شار عبوری از سطوح حجم کنترل بوجود می‌آیند (Hirsch, 1988). کمیت‌های جریان سیالات ممکن است بصورت اسکالر (مانند جرم) و یا برداری باشند (مانند اندازه حرکت).

شکل ۱. حجم کنترل Ω که توسط سطح S احاطه شده است را نشان می‌دهد. تغییرات مقدار کمیت اسکالر (M) در واحد حجم نسبت به زمان (t) به شار عبوری از سطح (\vec{F})، چشمه یا چاه‌های حجمی داخلی (Q_v) چشمه یا چاه‌های سطحی (\vec{Q}_s) بستگی دارد. تغییرات کمیت اشاره شده در حجم کنترل نشان داده شده در شکل ۱. نسبت به زمان t $(\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} M d\Omega)$ برابر با شار ورودی از سطح $(-\oint_S \vec{F} \cdot d\vec{S})$ بعلاوه سهم منابع داخلی $(\int_{\Omega} Q_v d\Omega)$ و منابع سطحی $(\oint_S \vec{Q}_s \cdot d\vec{S})$ است.

به مدل برای دبی ۶۷ لیتر بر ثانیه می‌باشد. با تغییر فاصله بین پایه‌های زوج، الگوی آبشستگی ناشی از وجود پایه‌ها نیز تغییر می‌کند. با افزایش فاصله بین پایه‌های پل سرعت منفی که نشان دهنده تشکیل گرداب در پشت پایه‌ها می‌باشد، کاهش می‌یابد و به عبارت دیگر گرداب‌های تشکیل شده در پشت پایه پل‌هایی که فاصله آنها از یکدیگر دورتر هستند ضعیف تر است (رضایی و علیزاده، ۱۳۹۴). همچنین در تحلیل سرریز سدها و حوضچه‌های آرامش نیز از مدل سه‌بعدی FLOW3D استفاده گردیده است (شهریاری و همکاران، ۱۳۹۵) و (خورشیدی و اسماعیل‌نژاد شیرازی، ۱۳۹۵). قریشی و همکارانش آبشستگی پایه‌های پل را با استفاده از نرم‌افزار SSIIM بررسی کردند. با توجه به اهمیت نقش پل‌ها در راهسازی بررسی دقیق پایداری آنها که عموماً در بستر رودخانه‌ها قرار دارد از اهمیت خاصی برخوردار است. از جمله مزیت‌های این نرم افزار کم هزینه بودن، سرعت عمل زیاد و دقت بالای آن نسبت عنوان شده است. نتایج تحقیق حاضر نشان داد عمق فرسایش در اطراف پایه بیشتر بوده و با دور شدن از پایه از شدت فرسایش بستر کاسته می‌شود همچنین با گذشت زمان شرایط تعادلی برقرار شده و نرخ فرسایش کاهش می‌یابد. روند تعادلی فرسایش در بالادست نسبت به پایین دست پایه کاملاً متفاوت بوده و نرخ آن در پایین دست به مراتب کمتر از بالادست می‌باشد (قریشی و کاردان، ۱۳۹۵). تعیین پروفیل سرعت در آبگیر براساس پارامترهای هندسی و هیدرولیکی آن، از دیگر مطالعاتی است که با مدل SSIIM انجام شده است (رستم آبادی، ۱۳۹۵). در مطالعات رسوب مخازن سدها نیز از این مدل استفاده شده است (سیفی و همکاران، ۱۳۹۴). در پژوهشی در رابطه با آبشکن‌ها، از نرم‌افزار fluent استفاده شده است. با استفاده از سه آبشکن با ضخامت‌های مختلف به بررسی میدان سرعت و الگوی جریان و تنش برشی حول آبشکن بصورت سه بعدی پرداخته شده است مدل‌سازی عددی با نتایج

با در نظر گرفتن \bar{U} بعنوان کمیت برداری جهت تعیین معادله بقاء، شار عبوری از سطح به صورت تانسور \bar{F} ، چشمه یا چاه‌های حجمی داخلی بعنوان بردار \bar{Q}_v و چشمه یا چاه‌های سطحی به شکل تانسور \bar{Q}_s بیان می‌گردند. بنابراین معادله (۱) به صورت زیر منتج می‌گردد (Hirsch, 1988).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \bar{U} d\Omega + \oint_S \bar{F} \cdot d\bar{S} = \int_{\Omega} \bar{Q}_v d\Omega + \oint_S \bar{Q}_s \cdot d\bar{S} \quad (5)$$

با استفاده از قانون گوس رابطه فوق به صورت زیر تبدیل می‌گردد:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \bar{\nabla} \cdot \bar{F} d\Omega = \int_{\Omega} \bar{Q}_v d\Omega + \int_{\Omega} \bar{\nabla} \cdot \bar{Q}_s d\Omega \quad (6)$$

و شکل دیفرانسیلی معادله بقاء برای کمیت‌های برداری به صورت زیر منتج می‌شود:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\bar{F} - \bar{Q}_s) = \bar{Q}_v \quad (7)$$

۳-۲- معادله بقای جرم (معادله پیوستگی) در فضای سه‌بعدی

در سیستم مختصات کارتزین بردار سرعت \bar{v} با سه مولفه u ، v و w در راستاهای x ، y و z بیان می‌گردد. معادله سه بعدی بقای جرم با فرض جریان تراکم ناپذیر در این دستگاه به صورت زیر است:

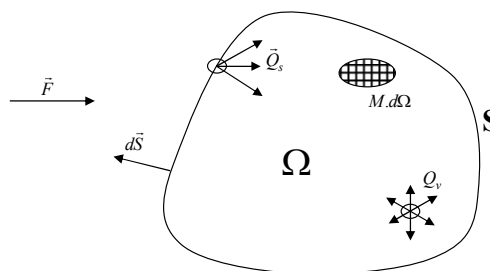
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

۴-۲- معادله بقای اندازه حرکت در فضای سه‌بعدی

دسته معادلات بقای اندازه حرکت جریان سطح آزاد آب در فضای سه بعدی به شکل زیر بیان می‌شود (Schlichting, 1968):

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \rho f_c v - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\rho f_c u - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad (10)$$



شکل ۱. جریان در حجم کنترل Ω با سطح کنترل S (Hirsch, 1988)

بیان ریاضی مطالب گفته شده به صورت زیر است (Hirsch, 1988):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} M d\Omega + \oint_S \bar{F} \cdot d\bar{S} = \int_{\Omega} \bar{Q}_v d\Omega + \oint_S \bar{Q}_s \cdot d\bar{S} \quad (1)$$

رابطه فوق معادله بقاء برای کمیت اسکالر M است. در این رابطه برای نشان دادن ضرب داخلی بردارها از علامت "·" استفاده شده است. در صورت عدم وجود منابع داخلی و سطحی، تغییرات داخلی کمیت به شار عبوری از سطح بستگی دارد.

با استفاده از قانون گوس در رابطه با شار ورودی از سطح و چشمه و چاه‌های سطحی، رابطه (۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial M}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \bar{\nabla} \cdot \bar{F} d\Omega = \int_{\Omega} \bar{Q}_v d\Omega + \int_{\Omega} \bar{\nabla} \cdot \bar{Q}_s d\Omega \quad (2)$$

با استفاده از معادله فوق شکل دیفرانسیلی معادله بقاء منتج می‌گردد:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot \bar{F} = \bar{Q}_v + \bar{\nabla} \cdot \bar{Q}_s \quad (3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\bar{F} - \bar{Q}_s) = \bar{Q}_v \quad (4)$$

معادله فوق نشان می‌دهد که منابع سطحی دارای اثری مشابه شارهای ورودی به حجم کنترل هستند.

۱-۲- قانون بقای کمیت‌های برداری

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\rho g - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (11)$$

$$T = \frac{\tau_0 - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \quad (15)$$

$$D_* = d_{50} \left(\frac{(\rho_s - \rho)g}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

q_b بار بستر برای یک سطح صاف، τ_0 تنش برشی بستر، τ_{cr} تنش برشی بحرانی بستر در بستر شیبدار، ρ_s چگالی رسوبات، d_{50} قطر متوسط ذرات رسوبی، ν ویسکوزیته سینماتیکی و g شتاب ثقل است.

در نهایت برای تخمین تغییرات ارتفاع رسوبات ته‌نشین شده از اصل بقای جرم به شکل زیر استفاده می‌شود:

$$(1 - \lambda) \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (q_{b,x} + q_{s,x}) + \frac{\partial}{\partial y} (q_{b,y} + q_{s,y}) = 0 \quad (17)$$

که در آن Z_b ارتفاع رسوبات در کف، λ تخلخل مصالح بستر، $q_{b,x}$ و $q_{b,y}$ بار بستر (حجمی) به ترتیب در راستای x و y که از معادله بار بستر وان راین قابل محاسبه است. $q_{s,x}$ و $q_{s,y}$ بار معلق (حجمی) بوده که از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$q_{s,x} = \int_{\delta_b}^h \left(uC - \mu_s \frac{\partial C}{\partial x} \right) dz \quad (18)$$

$$q_{s,y} = \int_{\delta_b}^h \left(vC - \mu_s \frac{\partial C}{\partial y} \right) dz \quad (19)$$

در معادلات فوق δ_b ضخامت لایه بار بستر، h عمق آب و C غلظت متوسط رسوبات معلق در هر سلول از شبکه محاسباتی است و از معادله انتقال-انتشار رسوبات (معادله ۱۲) محاسبه می‌شود.

۳- مدل‌های سه بعدی

مدل‌های عددی سه بعدی که در دهه‌های اخیر برای شبیه‌سازی جریانهای با سطح آزاد توسعه یافته‌اند از دیدگاه چگونگی تحلیل مسئله فشار، به دو دسته هیدرواستاتیک و غیر هیدرواستاتیک تقسیم می‌شوند. بسیاری از مدل‌های سه بعدی بر این فرضیه استوارند که مؤلفه شتاب در جهت قائم نسبت به شتاب ثقل کوچک و قابل اغماض بوده و بدین ترتیب معادله اندازه حرکت

P فشار، g شتاب گرانش، f_c پارامتر کوریولیس و τ_{ij} تنش برشی در راستای z در صفحه‌ای که محور عمود بر صفحه در راستای i است.

۲-۵- معادله رسوب

انتقال رسوبات را می‌توان به دو بخش بار معلق و بار بستر تقسیم نمود. جهت شبیه‌سازی بار معلق از معادله انتقال-انتشار غلظت رسوبات استفاده می‌گردد. معادلات متعددی از جمله معادله وان رین نیز جهت شبیه‌سازی بار بستر استفاده می‌شود. همچنین جهت تعیین تغییرات ارتفاع رسوبات بستر، قانون بقای جرم مد نظر قرار می‌گیرد. معادله انتقال-انتشار رسوبات به شکل زیر تعریف می‌گردد (Khosronejad et. al., 2007):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} + w_s \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_s \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_s \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_s \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (12)$$

در معادله فوق C غلظت رسوبات بوده و ضریب پخشیدگی رسوب μ_s به صورت معادله زیر با ادی ویسکوزیته ν_t مرتبط می‌شود:

$$\sigma_s = \frac{\nu_t}{\mu_s} \quad (13)$$

که در آن σ_s عدد پرائتل-اشمیت آشفتگی است و در بسیاری از جریان‌ها برابر مقدار ثابتی (بین ۰/۷ تا ۱) تخمین زده می‌شود. W_s بیانگر سرعت سقوط ذرات رسوب بوده و راستای z در راستای گرانش است. با حل معادله ۱۲، غلظت رسوبات برای همه سلول‌های شبکه محاسباتی به جز سلول‌های کف تخمین زده می‌شود.

برای محاسبه بار بستر که به عنوان شرایط مرزی سلول‌های کف هستند، از معادلات متعددی مانند وان راین به شرح ذیل استفاده می‌گردد:

$$q_b = 0.053 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g \right)^{0.5} \frac{d_{50}^{1.5} \tau^{2.1}}{D_*^{0.3}} \quad (14)$$

منظم تهیه شده و می‌تواند در قسمت‌های مورد نیاز از شبکه‌بندی ریزتر در درون شبکه محاسباتی اصلی نیز بهره‌گیرد. معادلات در دو حالت هیدرواستاتیک و غیر هیدرواستاتیک قابل حل است. از قابلیت‌های این مدل می‌توان به محاسبه توزیع فشار در عمق بصورت هیدرودینامیک، امکان شبیه‌سازی تر و خشک شدن محدوده محاسباتی در مدل سه‌بعدی و شبیه‌سازی جریان‌های ثقلی نظیر جریان‌های غلیظ اشاره کرد. روش محاسباتی به‌کار رفته در این نرم‌افزار سریع، پایدار و دقیق می‌باشد و می‌توان از آن برای مسائل جریان و رسوب مخزن استفاده نمود (خلیلی، ۱۳۸۴). در نگارش ۲۰۰۳ از نرم‌افزار MIKE3 به بعد، یک مدل سه‌بعدی قابل استفاده بر شبکه نامنظم نیز اضافه شده است که با روش احجام محدود کار می‌کند. هدف تهیه‌کنندگان این نرم‌افزار، توسعه بیشتر مدل شبکه نامنظم در نگارش‌های بعدی است (خلیلی، ۱۳۸۴).

۲-۳- نرم‌افزار Flow-3D

مدل FLOW-3D یکی از مدل‌های قوی در زمینه دینامیک سیالات است که توسعه و پشتیبانی آن توسط Flow Science, Inc صورت گرفته است. این مدل قابلیت تحلیل میدان جریان را بصورت یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی دارا بوده و محدوده کاربرد بسیار وسیعی را در مسائل مربوط به سیالات به خود اختصاص داده است. معادلات پایه‌ای مورد استفاده در این مدل، معادلات ناویراستوکس هستند و از پنج مدل آشفتگی مختلف در حل خصوصیات جریان‌های آشفته استفاده می‌کند. این مدل شامل الگوهای فیزیکی بسیاری از جمله آب‌های کم‌عمق، لزجت، کاویتاسیون، آشفتگی و محیط‌های متخلخل است. معادلات حاکم بر سیال با استفاده از روش حجم محدود حل می‌شود و محیط محاسباتی به شبکه‌ای با سلول‌های مربعی تقسیم می‌شود. در این نرم‌افزار قابلیت ریز کردن شبکه محاسباتی و همچنین تعریف بلوک‌های متعدد محاسباتی

در راستای قائم به توزیع فشار هیدرواستاتیک در عمق تبدیل می‌شود (چن ۲۰۰۳). اگر چه فرض توزیع فشار هیدرواستاتیک برای شبیه‌سازی جریان در شرایطی که مقیاس حرکت در جهت افق بسیار بیشتر از مقیاس حرکت در جهت قائم است کاربرد دارد اما در برخی شرایط لازم است که معادلات اندازه حرکت به طور کامل حل شده و به عبارت دیگر مؤلفه شتاب در جهت قائم نیز در نظر گرفته شود. بعنوان نمونه جریان اطراف سازه‌های هیدرولیکی از جمله این شرایط است که به علت وجود جریان پایین رونده در سطح بالادست آنها، فرض توزیع فشار هیدرواستاتیک صادق نبوده و استفاده از مدل‌های سه‌بعدی کامل، ضروری خواهد بود (ناگاتا و همکاران ۲۰۰۵). مدل‌های سه‌بعدی کامل به زمان و هزینه نسبتاً زیادی برای محاسبات نیاز دارند. از دیدگاه مهندسی و کاربردی یک مدل سه‌بعدی ساده شده برای کاهش زمان و هزینه محاسبات مورد نیاز می‌باشد. مدل‌های کاملاً سه‌بعدی درک مناسبی از تاثیرات کوتاه‌مدت سازه‌های پیشنهادی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد اما برای ارزیابی ریخت شناسی بلندمدت دارای محدودیت می‌باشند. دلیل این امر نیز محدودیت قدرت کامپیوترهای در دسترس است. این مدل‌ها در تجزیه و تحلیل پدیده‌های موضعی کاربرد زیادی دارند. برخی از مدل‌های سه‌بعدی علاوه بر شبیه‌سازی جریان قادر به بررسی رسوبات در مرزهای قابل فرسایش نیز هستند. در ادامه برخی از پرکاربردترین مدل‌های سه‌بعدی به همراه توضیحات کلی مربوطه ارائه شده است.

۳-۱- نرم‌افزار MIKE 3

نرم‌افزار MIKE 3 یک مجموعه مدل ریاضی سه‌بعدی است که توسط موسسه DHI دانمارک تهیه شده و برای شبیه‌سازی میدان جریان با سطح آزاد، پارامترهای کیفی آب، جابجایی رسوب و روند رسوب‌گذاری و فرسایش مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار بر اساس روش حجم محدود بر شبکه

۳-۴- نرم افزار SSIIM

این برنامه برای استفاده در مهندسی هیدرولیک و رسوب نوشته شده است و مبنای آن کاربرد روش حجم محدود با یک شبکه بندی نامتعاد سه بعدی است. در این مدل، معادلات پیوستگی و ناویراستوکس به همراه معادلات آشفتگی و نیز معادلات انتقال رسوب به صورت عددی حل می شوند. این مدل به صورت سه بعدی کامل است و جریان با سطح آزاد را مدل می کند و همچنین تغییرات فشار در عمق را به صورت غیرهیدرواستاتیک در نظر می گیرد. برای کوپل معادلات سرعت- فشار از الگوریتم SIMPLE و برای محاسبه شارها از روش قانون توانی Patankar و یا Upwind مرتبه دوم و از روش Rhie and Chow برای درون-یابی استفاده می کند (شکیبایی و همکاران، ۱۳۸۷). انواع شرایط مرزی قابل تعریف عبارتند از شرط مرزی دبی مشخص، شرط مرز جانبی با دبی مشخص، شرط مرزی باز بدون اطلاعات، شرط مرزی بسته. مشکل عمده این نرم افزار عدم استفاده از یک رابط کاربرپسند است و رابط کاربری آن یک فایل متنی است که کدهایی برای فعال سازی قسمتهای مختلف مدل تعریف و استفاده می شود.

۳-۵- نرم افزار TELEMAC-3D

نرم افزار TELEMAC-3D جهت مدلسازی سه بعدی جریان سطح آزاد در دریا و رودخانه با کاربرد اصلی در دریا است. برنامه قابلیت مدلسازی اثرات شتاب کریولیس و باد، اثرات درجه حرارت و شوری، وجود نواحی خشک در محدوده حل، انتقال رسوب و توزیع آلایندهها را دارد. مدلسازی جریان از طریق حل معادلات سه بعدی پیوستگی، اندازه حرکت به روش المان محدود در دو حالت هیدرواستاتیک و غیرهیدرواستاتیک با الگوریتم سه مرحله ای انتقال، انتشار و پخش امکان پذیر است. سطح آزاد آب با استفاده از معادله سینماتیک سطح آزاد و همچنین

وجود دارد. این مدل توانایی مدلسازی رسوب و آلودگی به صورت سه بعدی و با در نظر گرفتن تغییرات زمانی بستر را نیز دارد. در مدل FLOW 3D، رسوبات به دو صورت رسوبات معلق و رسوبات متراکم می توانند وجود داشته باشند. رسوبات معلق دارای غلظت پایین بوده و با سیال حرکت می کنند و رسوبات متراکم در محل تعریف شده توسط کاربر هستند و در اثر تنش برشی جریان در بستر شروع به حرکت می کنند (قاسم زاده و کوچک زاده، ۱۳۹۲).

۳-۳- نرم افزار FLUENT

این نرم افزار برنامه ای است جامع و مبتنی بر روش منقطع سازی حجم محدود که توسط کمپانی FLUENT Inc. در ایالت متحده آمریکا ساخته شده است. مدل اصلی بر اساس شبکه بندی با ساختار، سه بعدی و نامتعاد بود، اما نسخه های بعدی آن شبکه بندی ناساختار را نیز پشتیبانی می کند. اساس کار این مدل روش حجم محدود است. این نرم افزار می تواند جریان های دوبعدی و سه بعدی، سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی، جریان های لایه ای و آشفته، تراکم پذیر و تراکم ناپذیر، جریان های لزج، جریان های دو فازی و چند فازی را مدل کند. انواع شرایط مرزی از جمله جزر و مد، شرط مرزی باز بدون اطلاعات، انواع مرزهای ورودی و خروجی (نظیر دبی و سرعت) و ... در FLUENT قابل اعمال است. برای مدلسازی با این نرم افزار در ابتدا باید محدوده هندسی، شبکه، شرایط مرزی و نوع آنها در نرم افزار پیش پردازنده تعریف گردد. رابط سازنده این اطلاعات، نرم افزارهای GAMBIT و ICEM-CFD است که در واقع پیش پردازنده مدل Fluent می باشد. در سال ۲۰۰۶، این نرم افزار توسط شرکت ANSYS خریداری گردید و پس از آن با نام تجاری ANSYS-FLUENT و به صورت بخشی از مجموعه نرم افزاری ANSYS منتشر می شود (سعادت و زین العابدینی، ۱۳۹۴).

انتگرال گیری در عمق از معادله پیوستگی محاسبه می‌شود. مقادیر تنش‌های برشی با استفاده از مدل توربولانس صفر معادله‌ای، یک معادله‌ای و یا دو معادله‌ای محاسبه می‌گردد.

۳-۶- نرم افزار DELFT3D

نرم افزار DELFT3D جهت مدل سازی سه بعدی جریان ناشی از جزر و مد و تغییرات جوی در دریا، دریاچه، مناطق ساحلی و مخازن است. برنامه قابلیت مدل سازی جریان، انتقال رسوب و توزیع آلاینده‌ها را داراست. مدل سازی از طریق حل معادلات سه بعدی پیوستگی و اندازه حرکت به روش حجم محدود نیمه‌ضمنی در شبکه منطبق بر مرز در پلان و مختصات سیگما در مقطع قائم امکان پذیر است. مقادیر تنش‌های برشی با استفاده از مدل توربولانس صفر معادله‌ای، یک معادله‌ای و یا دو معادله‌ای محاسبه می‌گردد. مدل رسوب آن شامل محاسبات رسوب چسبنده و رسوب غیرچسبنده می‌باشد. اثر تغییرات مورفولوژیک بر میدان جریان و رسوب در این محاسبات در نظر گرفته می‌شود. یک مزیت مهم از مدل اینست که امکان نوشتن زیربرنامه‌های محاسباتی در آن لحاظ شده است. بدین ترتیب می‌توان نیازهای خاص مطالعات یک پروژه را اگر در مدل پیش‌بینی نشده باشد به آن اضافه نمود.

۳-۸- نرم افزار CECAD-THEMFIV

مدل CECAD-THEMFIV یک مدل سه بعدی است که با حل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در شبکه کارتیزین توسط روش حجم محدود تهیه شده است. این نرم افزار در دانشگاه برادفورد انگلستان تهیه شده که ویرایش با کاربرد عمومی آن به صورت تک لایه به عنوان نرم افزار CECAD-FSF قابل دسترس است. این نرم افزار برای مدل سازی جریان با سطح آزاد به صورت دو بعدی و سه بعدی تهیه شده و تغییرات فشار در امتداد قائم به صورت خطی منظور می‌گردد. در ویرایش‌های جدید این نرم افزار مدول مربوط به انتقال رسوب نیز اضافه گردیده است (عباس‌نیا، ۱۳۸۹).

۴- انتخاب مدل‌های مناسب جهت ارزیابی

دقیق‌تر

به علت طبیعت پیچیده فرآیندها و اندرکنش‌ها در احجام آبی، مدل‌های ریاضی عمدتاً مولفه‌های اساسی محیطی که بر فرآیندهای مختلف پخش و انتقال رسوب و آلاینده‌ها تأثیرگذارند را در نظر می‌گیرند. مدل سازی تمام مکانیسم‌ها و فرآیندهای موجود در طبیعت در یک مدل ریاضی، مشکل و در برخی موارد غیر ضروری است. بنابراین درجات مختلفی از سادگی یا پیچیدگی در مدل‌های ریاضی در نظر گرفته شده که باعث توسعه مدل‌های ریاضی در زمینه‌های مختلف از قبیل هیدرودینامیک، انتقال رسوب و کیفیت آب شده است.

۳-۷- نرم افزار NASIR

در این نرم افزار که در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهیه گردیده است، از روش حجم محدود برای حل معادلات حاکم بر انتقال و پخش کمیت‌های مورد نظر در حرکت مایعات و گازها استفاده می‌شود. در این مدل می‌توان از شبکه‌های بی‌ساختار که امکان مدل سازی محیط‌های با هندسه پیچیده را فراهم می‌کند، بهره گرفت. این نرم افزار دارای ماژول‌های تحلیل حجم محدود برای شبیه سازی مسائل علمی و صنعتی در زمینه مهندسی عمران می‌باشد (اصغری،

لازم به ذکر است که هزینه تهیه و خرید برخی از بسته‌های نرم‌افزاری بسیار بالاست، به‌طوریکه در طرح-های کوچک و یا حتی نسبتاً بزرگ مقرون به صرفه نیست. در حال حاضر بسته قفل شکسته آن در بازار موجود است که چندان نمی‌توان به نتایج شبیه‌سازی آن اعتماد کرد (عزیزیان، ۱۳۸۹).

۵- مقایسه مدل‌های سه بعدی و انتخاب مدل مناسب

در بند ۳، شرح مختصری از مدل‌های عددی سه بعدی تجاری ارائه گردید. بررسی موارد ذکر شده موید این مهم است که بیشتر مدل‌های عددی از روش حجم محدود برای منقطع سازی معادلات حاکم بر حرکت سیال استفاده می‌نمایند. اولین مرحله برای حل عددی معادلات، تولید شبکه محاسباتی است. برای تولید شبکه 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 با کمترین تعداد المان، بیشترین دقت محاسباتی حاصل گردد. در بسیاری از مواقع مدل‌های هیدرودینامیک به نوع شبکه و چگونگی توزیع و شکل المانها حساسیت زیادی نشان می‌دهند. در چنین مواردی باید خصوصیات شبکه تولید شده به دقت مورد توجه قرار گیرد، تا شرایط مورد نیاز مدل هیدرودینامیک را به خوبی فراهم آورد. برای شبکه بندی محیط فیزیکی استفاده از شبکه با ساختار مستطیلی و ناساختار مثلثی در مدل‌های عددی دیده می‌شود. در غالب اوقات هندسه مرزهای محیط شبیه‌سازی بسیار نامنظم است و یا وضعیت جریان در محدوده کوچکی از محیط حل دارای اهمیت بیشتری نسبت به سایر نقاط است. در این موارد استفاده از شبکه ناساختاریافته ابزاری توانمند برای شبیه‌سازی جریان در مطالعات محلی فراهم می‌نماید. مدل‌های عددی که از شبکه ناساختار یافته یا سیستم مختصات منطبق بر مرز (محورهای منحنی الخط) بهره

بر این اساس برای مدلسازی یک یا چند پارامتر خاص در منطقه مورد مطالعه گزینه‌های مختلفی از مدل‌ها پیش روی یک مهندس طراح قرار دارد که بایستی از بین آن‌ها یک مدل مناسب را انتخاب نماید.

انتخاب یک مدل مناسب شامل سه فاز مختلف می‌باشد که عبارتند از:

- ۱- تعیین لیستی از مدل‌های موجود برای ارزیابی پدیده‌ها
 - ۲- توسعه مجموعه‌ای از معیارها برای ارزیابی مدل‌ها
 - ۳- تعیین مدل‌های برتر و مناسب بر حسب ارزیابی معیارها
- مرحله اول که شامل تهیه یک لیست از مدل‌های موجود می‌باشد در قسمت قبل ارائه گردید. معیارها و ویژگی‌های موثر در انتخاب مدل‌های ریاضی به شرح ذیل می‌باشد:

- ✓ وجود مرجع علمی و راهنمای مدل
- ✓ امکان حمایت و پشتیبانی فنی و علمی از مدل
- ✓ کاربرد دوست بودن مدل
- ✓ بعد مکانی مدل (یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی)
- ✓ قابلیت کاربرد در سخت‌افزارها و برنامه‌های معمول
- ✓ امکان ارتباط با سایر نرم‌افزارهای کاربردی مهندسی مانند AutoCad و GIS و ...
- ✓ اطلاعات خروجی مناسب و به شکل مطلوب
- ✓ هزینه دستیابی به نرم‌افزار
- ✓ حداقل اطلاعات ورودی مورد نیاز
- ✓ حداقل نیاز به کالیبراسیون
- ✓ صحت‌سنجی و کاربرد در موارد مشابه
- ✓ میزان موفقیت در کاربردهای قبلی توسط دیگران (داخل و خارج کشور)
- ✓ دسترسی به لیست برنامه مدل و امکان افزودن قابلیت‌های مورد نیاز.

از قابلیت‌های نرم‌افزار FLOW-3D، می‌توان به توانایی این نرم‌افزار در شبیه‌سازی فرسایش، انتقال و ته‌نشین شدن رسوبات و استفاده از مدل‌های آشفتگی طول اختلاط پراتل، یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ مدل گروه‌های نرمال شده و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، اشاره کرد. نرم‌افزار Flow-3D در زمینه شبکه‌بندی برتری‌های قابل‌توجهی نسبت به اکثر نرم‌افزارهای CFD دارا می‌باشد. از جمله اینکه امکان شبکه‌بندی مطابق با دو سیستم مختصاتی کارتزین و استوانه‌ای در آن تعبیه شده است. شبکه‌بندی استوانه‌ای موجب می‌شود در بعضی از مسائل که مرزهای منحنی شکل خاصی دارند، شبکه‌ها بر مرزهای میدان و موانع انطباق بهتری داشته و دقت محاسبات افزایش یابد. همچنین شبکه‌بندی میدان مطالعاتی توسط خود نرم‌افزار صورت می‌گیرد که نیاز به نرم‌افزارهای جانبی را مرتفع نموده است. از جمله امکانات دیگری که در قسمت شبکه‌بندی تعریف شده است، امکان استفاده از چند شبکه به‌طور هم‌زمان است که می‌توانند بر هم‌پوشانی داشته باشند. بدین طریق می‌توان در نقاطی که دقت بیشتری در محاسبات نیاز است، شبکه‌بندی با شبکه‌های کوچک‌تر داخل شبکه اصلی قرار گیرد. ابعاد انتخاب شده برای شبکه‌ها در سه بعد مستقل از هم می‌باشند. همچنین روش‌های متنوعی برای اعمال شرایط مرزی وجود دارد. شرط‌های مرزی فشار، سرعت، دیوار، متناوب، متقارن، دبی، پیوسته، روی هم قرار گرفتن شبکه‌ها و موج در این مدل قابل اعمال است. در زمینه نمایش خروجی نتایج، امکان رسم نمودارهای تمامی پارامترها برحسب زمان مدل‌سازی و یا برحسب مکان توسط خود نرم‌افزار فراهم شده است در تمامی قسمت‌ها امکان ذخیره و چاپ خروجی‌ها در قالب تصاویر توسط نرم‌افزار فراهم شده است. همچنین امکان مشاهده و ذخیره نتایج قسمت‌های دو و سه‌بعدی در قالب تصاویر متحرک (انیمیشن) نیز وجود دارد (قاسم‌زاده و کوچک‌زاده، ۱۳۹۲).

می‌برند برای حصول به نتایج دقیق‌تر در هندسه‌های نامنظم و پیچیده دارای مزیت می‌باشند. با توجه به اینکه معادلات حاکم در مدل‌های بررسی شده، معادلات رینولدز می‌باشند نکته قابل توجه دیگر، توانایی مدل عددی در شبیه‌سازی آشفتگی برای بررسی پدیده‌های هیدرولیکی است که آشفتگی در آن حائز اهمیت می‌باشد. پیش‌بینی محل سطح آزاد و تغییرات آن در طول زمان نیز از دیگر مسائلی است که در حل معادلات سه بعدی از جایگاه فوق‌العاده‌ای برخوردار است. جریان‌هایی که دارای تغییرات شدید سطح آزاد آب و گاهی اوقات بصورت تاخوردگی می‌باشند، نیازمند استفاده از روش‌های خاص ردیابی سطح آزاد آب است. توانایی شبیه‌سازی رسوب، کیفیت آب و کاربر دوست بودن مدل نیز از دیگر مواردی است که در مدل‌های تجاری عددی عنوان شده، قابل بحث و بررسی است. در حالت کلی توانایی‌های مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولیکی به ویژه جریان‌های دریایی و رودخانه‌ای متفاوت است. با توجه به مطالبی که در این بخش بعنوان نکات مهم در مدل‌های هیدرودینامیک ذکر گردید، مدل تجاری FLOW-3D بعنوان یکی از گزینه‌های مناسب پیشنهاد می‌گردد. مدل FLOW-3D با وجود امکان کاربرد در انواع سیالات، بدلیل ویژگی‌هایی که دارد، به طور خاص در کاربردهای هیدرولیکی راه یافته و جواب‌های قابل قبولی نیز در این زمینه ارائه داده است. همین امر باعث گسترش کاربران این مدل و رفع نواقص و محدودیت‌های آن شده و باعث افزایش بیش از پیش کاربرد این نرم‌افزار در حوزه‌های مختلف مکانیک سیالات بویژه در هیدرولیک کانال‌های باز و سازه‌های هیدرولیکی و محبوبیت آن در بین طراحان و کاربران CFD شده است. مدل عددی FLOW-3D، در مقایسه با سایر مدل‌های موجود در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی، دارای دامنه وسیعی از کاربردها و قابلیت‌ها است، کاربر دوست بوده و رابط گرافیکی بسیار قوی دارد که کار با آن را آسان‌تر می‌کند.

۶- نتیجه گیری

شناخت سه بعدی اثرات جریان بر سازه های مهندسی مورد توجه محققین زیادی بوده است. به عنوان مثال تاثیر سیلاب بر مسیر راه و ابنیه فنی آن (پل، آبرو و ...) از اهمیت زیادی برخوردار است تا آنجا که عدم شناخت کافی و دقیق می تواند منجر به خسارات زیاد مالی و جانی گردد. بدین منظور استفاده از مدل های عددی سه بعدی تجاری در مطالعه پدیده های هیدرولیکی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. مدل های عددی مختلف با توانایی ها و امکانات متعددی نیز در دسترس است. کاربران بسته به نیاز خود و میزان آشنایی با هر کدام از این نرم افزارها، یکی از این مدل ها انتخاب می کنند. اساس عملکرد همه این مدل ها، معادلات بقای جرم و اندازه حرکت است که با فرضیات ساده کننده ای نسبت به حل این معادلات اقدام شده است. عمدتاً تهیه کنندگان نرم افزارها، راهنما و مراجع علمی به همراه مثال های کاربردی متعددی در اختیار کاربران قرار داده که براساس آن ها قابلیت ها و کارآمدی این مدل ها تعیین می گردد. در این مقاله مدل های تجاری پرکاربرد بررسی شده و نرم افزار FLOW3D جهت شبیه سازی جریان و رسوب در پدیده های هیدرولیکی موضعی پیشنهاد شده است. در این نرم افزار قابلیت ارتباط با نرم افزارهای نمایشی دیگر نیز لحاظ شده است. با امکان استفاده از ماژول های متعدد جریان و رسوب و آشفتگی، دامنه وسیعی از نیازهای کاربران در تحلیل جریان در اطراف سازه های هیدرولیکی مرتفع می شود. کاربرد دست بودن و عدم نیاز به نرم افزارهای جانبی جهت شبکه بندی میدان محاسباتی از دیگر قابلیت های این مدل است. همچنین دانش فنی مورد نیاز این نرم افزار نسبتاً بالاست و توصیه می شود که در ورود اطلاعات دقت کافی مدنظر قرار گیرد. استفاده از این نرم افزار در حالتی که تعداد المان زیاد باشد مقرون به صرفه نیست زیرا گاهی ممکن است سخت افزارهای

رایانه ای موجود جوابگو نباشد و مدت زمانی شبیه سازی بسیار طولانی گردد.

۷- مراجع

- اصغری، ز، (۱۳۹۲)، "واسنجی و صحت سنجی مدل های ترکیبی سه بعدی و یک بعدی برای آبراهه بلند"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

- جوادیان، آ، اختری، ع.ا. و سید اشرف، ا.، (۱۳۹۵)، "شبیه سازی عددی جریان در قوس تند ۹۰ درجه با دیوار میانی و تأثیر آن بر جریان"، کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، تهران.

- خلیلی، م، (۱۳۸۴)، "مدلسازی سه بعدی جریان در مخزن سد"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

- خورشیدی، ح. و اسماعیل نژاد شیرازی، م، (۱۳۹۵)، "ارزیابی تاثیر ارتفاع دندان های انتهایی حوضچه های آرامش بر مشخصات هیدرولیکی جریان توسط نرم افزار (Flow3D)"، دومین کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری و توسعه شهری، بابل.

- رستم آبادی، م، (۱۳۹۵)، "بررسی تغییرات سرعت درآبگیر باتغییر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی آبگیر در قوس"، پانزدهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران، قزوین، انجمن هیدرولیک ایران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره).

- رضایی، و عزیزاده، ه.، (۱۳۹۴)، "مدل سازی عددی آبستنگی پایه پل ها با مقاطع دایروی در مدل عددی Flow3D"، سومین کنفرانس بین المللی پژوهش های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

- نرم افزار FLUENT، همایش ملی معماری، عمران و توسعه نوین شهری، تبریز.
- قاسم زاده، ف. و کوچکزاده، ص.، (۱۳۹۲) "شبیه سازی مسائل هیدرولیکی در Flow 3D"، انتشارات نوآور.
- قریشی، س.ک. و کاردان، ن.، (۱۳۹۵)، "ارزیابی میزان آبستگي پایه پل با استفاده از نرم افزار SSIIM"، کنفرانس ملی پژوهش های نوین در علوم فنی و مهندسی، اردبیل.
- کریمی، پ.، عبدالمهی، ص.، اختری، ع.ا. و حسینی، س.ا.، (۱۳۹۳)، "مدلسازی عددی تاثیر ضخامت آبشکن بر میدان سرعت و تنش برشی در کانال با قوس ۹۰ درجه با استفاده از نرم افزار فلونت"، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی.
- Hirsch, C., (1988), Numerical computation of internal and external flows, John Wiley & Sons Ltd.
- Khosronejad, A., Rennie, C. D., Salehi Neyshabouri, S. A. A. and Townsend, R. D., (2007), "3D Numerical Modeling of Flow and Sediment Transport in Laboratory Channel Bends", Journal Of Hydraulic Engineering, Vol. 133, pp. 1123-1134.
- Lomax, H. and Pulliam, T.H. (1999), Fundamentals of computational fluid dynamics, University of Toronto.
- Schlichting, H. (1968), Boundary- Layer Theory, 6th Ed., McGrawHill Book Co., Inc., New York, N.Y.
- سعادت، ا. و زین العابدینی، م.، (۱۳۹۴)، "اصول شبیه سازی مقدماتی و پیشرفته دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از نرم افزارهای FLUENT و CFX"، شرکت خدمات مهندسی پرداد پترو دانش.
- سیفی، ع.، خدادوست سیوکی، س. و حسن زاده، ی. (۱۳۹۴)، "شبیه سازی و ارزیابی روند رسوبشویی توسط مدل سه بعدی SSIIM"، چهاردهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران، زاهدان، گروه مهندسی عمران دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- شکیبایی نیا، ا.، زراتی، ا.ر. و مجدزاده طباطبایی، م. ر.، (۱۳۸۷)، "کاربرد مدلسازی عددی سه بعدی در شبیه سازی پدیده های پیچیده مهندسی رودخانه"، نشریه دانشکده فنی، دوره ۴۲، شماره ۴.
- شهریاری، غ. ر.، نعمتی، ا.، مستوفی، ک.ح. و آدینه، م.، (۱۳۹۵)، "بررسی تاثیر شیب بالادست و پایین دست مقطع بر هیدرولیک جریان در سرریزهای استوانه ای با استفاده از نرم افزار Flow 3D"، دومین کنفرانس بین المللی یافته های نوین پژوهشی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران.
- عباس نیا، ا.ح.، (۱۳۸۹)، "بررسی تاثیر چرخش بر روی آبکنی و فرسایش"، دانشگاه تهران.
- عزیزیان، ا.، (۱۳۸۹)، "مطالعات میدانی و نرم افزاری تعیین مکان های مناسب برداشت مصالح رودخانه ای و ارائه بسته نرم افزاری کاربردی"، پایان نامه ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.
- فرقان پرست، ف. و محمدی، ف. (۱۳۹۳)، "بررسی و مقایسه عملکرد چهار مدل آشفتگی برای تحلیل جریان در یک کانال با قوس ۱۸۰ درجه u شکل با استفاده از