کاربرد مدل‌های عددی در شبیه‌سازی رفتار رودخانه‌های مشرف به مسیر راه

امیر محجوب، استادیار، پژوهشکده حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
امیرحسین عباس‌نیا، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، پردیس، ایران
فواد کیلانه‌ئی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.mahjoob@bhrc.ac.ir
تاریخ دریافت : 95/09/07 - تاریخ پذیرش:95/12/15

چکیده

احداث، تعمیر و نگهداری زیرساخت‌های حمل و نقل جاده‌ای و ریلی بسیار گرانقیمت هستند. شناخت دقیق پدیده‌هایی که به این زیرساخت‌ها آسیب می‌رسانند، می‌تواند کمک شایانی به مدیریت هزینه‌ها کند. یکی از مهمترین این پدیده‌ها سیلاب است. در دهه‌های اخیر مطالعه عددی سیل‌های رخ داده در مجاورت جاده‌ها و خطوط ریلی مورد توجه محققین قرار گرفته است. در تحقیق حاضر معادلات حاکم یک‌بعدی و دوبعدی جریان ارئه شده است و در این زمینه مدل‌های تجاری موفق مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. از بین مدل‌های ارائه شده، نحوه عملکرد دو مدل منتخب یک بعدی و دو بعدی در زمینه اثر سیلاب بر مسیر مورد بازبینی دقیق‌تر قرار گرفته است. در نهایت موارد پیشنهادی استفاده از این مدل‌ها ارائه گردیده است. از نتایج قابل ذکر اینست که استفاده از مدل‌های یک‌بعدی برای تحلیل کلی از یک منطقه بزرگ که بتوان غالب جریان را خطی در نظر گرفت، بسیار سودمند خواهد بود. علیرغم اینکه این مدل‌ها قابلیت بررسی پدیده‌های جزیی مانند اثرات پایه پل‌ها و کالورت‌ها را نیز دارا می‌باشند، اما در صورتی که جزییات پدیده برای پروژه مورد مطالعه از اهمیت بالایی برخوردار باشد، پیشنهاد می‌گردد که از نرم‌افزارهای دوبعدی و سه‌بعدی با توانایی بالاتر استفاده گردد. از اینرو استفاده مدل‌های دوبعدی نظیر مدل CCHE2D با قابلیت بهره‌گیری از انواع مدل-های آشفتگی و شبیه‌سازی همزمان بار معلق و بار بستر در حالت غیر تعادلی، غیریکنواخت و رسوب چسبنده و غیرچسبنده، مناسب است. همچنین استفاده از مدل‌های معرفی شده یک‌بعدی و دوبعدی در پدیده‌هایی که ماهیت کاملا سه‌بعدی دارند، توصیه نمی‌گردد.

واژه‌های کلیدی: مدلسازی عددی، پل، مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی، جریان در رودخانه، آبشستگی

1- مقدمه

تا چند دهه پیش، مطالعه حرکت سیالات فقط از روش تجربی و یا روش‌های تحلیلی همراه با فرضیات بسیار قابل انجام بود. با پیدایش کامپیوترها، هزینه‌های محاسباتی کاهش یافت و بشر توانست پدیده‌های پیچیده‌تری را مورد تحلیل قرار دهد. یکی از زمینه‌های علمی که با افزایش قدرت محاسباتی پیشرفت زیادی در آن صورت گرفت، دینامیک سیالات محاسباتی است. در واقع دینامیک سیالات محاسباتی علمی است که با بکارگیری فناوری‌های نوین در زمینه علوم رایانه و توانمندی‌های محاسباتی، به حل رفتار سیال می‌پردازد.

یکی از شاخه‌های دینامیک سیالات محاسباتی، علم مهندسی آب یا هیدرولیک است که این شاخه نیز اخیرا پیشرفت زیادی داشته است. علم دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند با بکارگیری مدل‌های آشفتگی، تا حدودی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار آب موفق باشد. مدل‌های ریاضی شبیه‌سازی جریان که مبتنی بر دینامیک

سیالات محاسباتی هستند در مقایسه با روش‌های تجربی دارای چند مزیت عمده هستند. کاهش اساسی در زمان و هزینه طراحی‌ها، افزایش توان مطالعه سیستم‌های پیچیده که انجام آزمایشات کنترل شده روی آنها مشکل یا غیرممکن است و افزایش سطح جزییات در ارائه نتایج، چند نمونه از این مزایا هستند. البته استفاده حرفه‌ای از مدل‌های ریاضی نیز دارای مسائل و مشکلاتی نظیر واسنجی مدل، انتخاب معادلات حاکم و روش‌های شبیه‌سازی مناسب و ... است.

از طرف دیگر پدیده سیلاب به عنوان یکی از مخاطرات جدی، سیستم‌های حمل و نقل به خصوص حمل و نقل جاده‌ای و ریلی را تهدید می‌کند. شناخت پدیده سیلاب و پیش‌بینی رفتار آن می‌تواند کمک شایانی به حفظ سرمایه‌های گرانقیمت زیرساخت‌های حمل و نقل باشد. مدل‌های عددی تجاری متعددی موجود است که قابلیت شبیه‌سازی هیدرولیکی سیلاب را دارند. در این مقاله به بررسی برخی از موفق‌ترین نرم‌افزارهای هیدرولیکی جریان جهت شبیه‌سازی سیلاب پرداخته خواهد شد.

در بررسی عددی رفتار سیلاب‌ها، شناخت معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر جریان سیال، شرایط اولیه، شرایط مرزی و تعیین میدان هندسیِ سیال بسیار حائز اهمیت است. در این روش‌ها میدان هندسی به المان‌های متعددی تقسیم می‌گردد. سپس معادلات حاکم با استفاده از تکنیک‌های موجود برای هر المان منقطع شده و معادلات جبری مورد نیاز منتج می‌شود. در نهایت با ایجاد ارتباط بین المان‌ها و اعمال شرایط مرزی، پارامترهای هیدرولیکی استخراج می‌شود.

روش‌های منقطع‌سازی ساده ممکن است در میدان هندسی ساده جواب خوبی داشته باشد، اما در مواقعی که در میدان هندسی پیچیدگی وجود داشته باشد، بدست آوردن جواب‌های مناسب از آن مشکل است. همچنین روش‌های منقطع سازی ساده تقریب خوبی برای توابع ناپیوسته نیست. با درنظر گرفتن مسائلی از قبیل مدل‌سازی گرادیان‌های تند، ناپیوستگی‌ها و امثال آن ملاحظه می‌شود که روش‌های عددی نیز دارای محدودیت‌هایی هستند. مشکلاتی نظیر ناپایداری، ناهمگرایی و نوسان در نتایج از جمله این مشکلات هستند. برای از بین بردن مشکلات مذکور، لازم است تمهیدات مناسبی در نظر گرفته شود. هرکدام از نرم‌افزارها به نحوی سعی در برطرف کردن این مشکلات داشته‌اند. در ادامه برخی از کاربردهای مدل‌های عددی در شبیه‌سازی جریان مشرف به مسیر راه ارائه شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

در تحقیقی بررسی تاثیر پل‌های محمدحسن‌خان، بابلرود، موزیرج و مرزن‌آباد بر سیلاب رودخانه بابلرود مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور در دو حالت وجود پل و عدم وجود پل، عمق و پهنه سیلاب با دوره بازگشت‌های 10، 25، 50، 100 و 200 ساله مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه از دو نرم افزار ArcGISو HEC-RAS و الحاقیه HECGeoRAS استفاده گردید. نتایج این تحقیق نشان داد وجود پل‌ها هم بر عمق و هم بر پهنه سیلاب موثر بوده وموجب افزایش عمق و پهنه سیلاب حداکثر 26 سانتی متر و 2 هکتار نسبت به حالت عدم وجود پل گردیده‌اند (رکمان زاده و باقری، 1394).

تعیین رابطه میان پارامترهای مؤثر بر عمق آبشستگی در محل پل‌ها و حداکثر عمق آبشستگی و یافتن تابع حاکم بر آنها از موضوعات مهم در مهندسی هیدرولیک است. در پژوهشی استفاده از نرم افزار HEC-RAS به عنوان مدل شبیه‌سازی در محیط مجازی به همراه دوازده معادله تجربی با بررسی تحقیقات گذشته انتخاب گردید. ضمناً شش دبی با دوره بازگشت 2، 5، 10، 20، 50 و 100 ساله استفاده شد و نتایج معادلات تجربی و نتایج HEC-RAS با پراکندگی در بعد طول یک رودخانه (هراز) جهت ایجاد شرایط یکسان هیدرولوژی و هیدرولیکی و با همدیگر بررسی و مقایسه گردید. نتایج نشان داد که معادله CSU2001از خطای کمتری نسبت به سایر معادلات تجربی برخوردار است (موسوی و دانشفراز، 1394).

به منظور شبیه سازی هیدرولیکی رودخانه چرداول در بازه چناره، مطالعات ابتدایی جهت انتخاب یک بازه از رودخانه که آمار و اطلاعات کافی را برای تحلیل های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی داشته باشد، صورت گرفت. سپس بدلیل فقدان نقشه‌های توپوگرافی رودخانه در بازه موردنظر ابتدا بازه‌ای به طول 1/5 کیلومتر نقشه‌برداری شد. آمار و اطلاعات هیدرولوژی شامل متوسط دبی های روزانه و دبی های حداکثر لحظه‌ای در ایستگاه دارتوت از سازمان آب منطقه‌ای ایلام جمع‌آوری شد. پس از انجام تست‌های همگنی و تصادفی، با استفاده از روش رگرسیون داده‌های دبی حداکثر لحظه‌ای تکمیل شدند. با استفاده از متوسط دبی‌های روزانه همان ایستگاه و بوسیله نرم‌افزار SMADA توزیع‌های مختلف به داده‌های مشاهداتی و تکمیل‌یافته برازش یافت و با روش آزمون خطای استاندارد، بهترین توزیع برای داده‌ها تعیین شد. با معرفی دبی‌های مختلف به مدل، مدل اجرا شد و نتایج مختلفی از جمله پروفیل های سطح آب، پروفیل طولی رودخانه، منحنی دبی–اشل و نمودار های مختلفی مانند سرعت و تنش برشی استخراج شد(همتی و همکاران، 1394).

در تحقیقی شرایط هیدرولیکی جریان شامل تغییرات عمق، سرعت متوسط و تنش برشی کل در طول بازه‌ای از رودخانه ناورد در استان گیلان که دارای چند دهنه پل، دهانه آبگیر و در تماس با راه روستایی است با استفاده از مدل های عددی CCHE2D شبیه‌سازی گردید. بررسی نتایج در سیلاب‌های با دوره‌های بازگشت، 10، 25 و 50 ساله در رودخانه مورد مطالعه نشان داد که رژیم جریان برای سیلاب‌های بزرگتر از 10 سال فوق بحرانی گشته و تنش‌برشی در بخش عمده ای از مسیر رودخانه بسیار فراتر از تنش برشی مجاز می‌شود مقایسه نتایج حاکی از آن است که به دلیل ساخت دیواره‌های ساحلی در بخش‌های آسیب‌پذیر رودخانه از نظر سیلاب، خطر سیل‌گیری اراضی در سیلاب‌های مورد بررسی به حداقل خواهد رسید (اسمعیلی و همکاران، 1393).

از جمله اقدامات در جهت اصلاح و بهسازی مسیر رودخانه‌ها، حذف پیچانرودها و ایجاد میان‌بر مناسب است که افزایش شیب خط انرژی و نهایتاً افزایش ظرفیت انتقال و آبگذری رودخانه را بدنبال دارد. این پدیده برای رودخانه‌هایی که در مجاورت شهرها قرار دارند و احتمال وقوع سیلاب و طغیان رودخانه‌ها به درون شهر وجود دارد قابل بررسی است. زمان پور و همکاران رودخانه کارون واقع در استان خوزستان را بررسی کردند. در محدوده‌ی مورد مطالعه رودخانه الگوی پیچانرودی را تجربه نموده است و همچنین با توجه به تشکیل جزایر و رسوب‌گذار بودن رودخانه در محدوده شهر اهواز، موجب می‌شودکه افزایش تراز آب در سیلاب‌های رخ داده متوجه شهر باشد. لذا در این مطالعه با استفاده از نرم افزار دو بعدی CCHE2D با فرض احداث میان‌بر اقدام به حذف پیچانرودهای چنیبیه و کریشان شده است. بررسی نتایج هیدرولیکی رودخانه نشان می دهد که حذف میاندر موجب افزایش شیب خط انرژی رودخانه، سرعت جریان و در نتیجه ظرفیت آبگذری رودخانه می‌گردد. با توجه به پیش‌بینی مدل، متوسط سرعت جریان 50 درصد نسبت به مسیر موجود افزایش می یابد(زمان‌پور و همکاران، 1394).

برای مطالعه تاثیرات تغییرات بر روی رودخانه جورای از مدل دوبعدی CCHE2D استفاده شده است. از مدل مذکور برای ارزیابی ویژگی‌های هیدرودینامیکی رودخانه استفاده شده است. برای تعیین شرایط مرزی مدل مذکور از روندیابی در مدل یک‌بعدی HEC-RAS استفاده شده است. سناریوهای مختلف مانند اثر آبشکن‌ها، لایروبی بستر رودخانه، تجاوز به ساحل رودخانه مورد بررسی قرار گرفته است. ارزیابی‌های مورفولوژیکی مانند تغییرات حمل رسوب و سطح و بستر مورد مطالعه قرار گرفته است(Nishan and Muneer, 2014).

در تحقیق دیگری از مدل CCHE2D برای بررسی انتقال رسوب در رودخانه کارون استفاده شده است. تغییرات پارامترهای سرعت، عدد فرود، تنش برشی و تراز بستر رودخانه محاسبه و بحث شده است. یکی از نتایج

مهم تحقیق مذکور این بوده است که در شرایط جریان با سیلاب بیش از 50 ساله، بستر رودخانه از حالت رسوب گذاری به فرسایشی تبدیل خواهد شد(Kamanbedast et. al., 2013).

در این مقاله سعی شده است تا با بیان معادلات حاکم بر پدیده‌ها در فضای یک‌بعدی و دوبعدی، آشنایی اولیه در مورد نحوه عملکرد مدل‌های تجاری ایجاد گردد و در ادامه شرح مختصری از هر کدام از نرم‌افزارهای مذکور ارائه می‌گردد. از بین مدل‌های ارائه شده، نحوه عملکرد دو مدل منتخب یک‌بعدی و دوبعدی در زمینه اثر سیلاب بر مسیر مورد بازبینی دقیق‌تر قرار گرفته است. در نهایت موارد پیشنهادی استفاده از این مدل‌ها ارائه گردیده است.

2- معادلات یک‌بعدی

دسته معادلات بقای جرم و اندازه حرکت در فضای یک‌بعدی به معادلات سنت ونانت معروف هستند. فرضیات زیر در استخراج معادلات سنت ونانت مورد استفاده قرار گرفته است (Stoker, 1957).

1- توزیع هیدرواستاتیک فشار: این فرض زمانی که خطوط جریان دارای انحنا تندی نباشند، مجاز است.
2- شیب کف کانال کم باشد: بنابراین عمق‌های جریان که بطور عمودی از کف کانال و بصورت قائم اندازه‌گیری می‌شود تقریبا یکسان است.
3- سرعت جریان در کل مقطع کانال یکنواخت است.
4- اتلاف انرژی در جریان دائم را می‌توان با استفاده از قوانین مقاومت جریان‌های دائم، نظیر معادله شزی یا مانینگ، بیان کرد.
5- جریان تراکم ناپذیر و همگن است.

با اعمال مفروضات فوق معادلات سنت ونانت به صورت زیر خواهد بود (Chanson, 2004; Stoker, 1957).

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=q_l \qquad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\beta Q^2}{A}\right)+gA\frac{\partial \zeta}{\partial x}+gA(S_f-S_0)=V_x q_l \qquad (2)$$

معادله 1 معادله بقای جرم و معادله 2 معادله بقای اندازه حرکت است. در معادلات مذکور x محوری در امتداد طولی کانال است. t پارامتر زمان، A سطح مقطع، Q S_0 شیب کف کانال، g شتاب گرانش، β ضریب اصلاح اندازه حرکت بدلیل توزیع غیریکنواخت سرعت در مقطع، q_l دبی جانبی به کانال در واحد طول (دبی جانبی ورودی مثبت و دبی جانبی خروجی منفی است)، V_x مولفه سرعت جریان ورودی جانبی در جهت x است و S_f شیب خط انرژی است. مقادیر β و S_f از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$\beta=\frac{1}{V^2A}\int_A u_l^2 dA \qquad (3)$$

$$S_f=\frac{n^2V|V|}{R^{4/3}} \qquad (4)$$

$$V=\left(Q/A\right) \qquad (5)$$

که u_l سرعت در راستای طولی کانال برای نقاط مختلف مقطع، V سرعت متوسط مقطع و R شعاع هیدرولیکی مقطع است. با اعمال $Q=AV$ و با فرض عدم وجود جریان جانبی در معادله بقای اندازه حرکت 2، شکل دیگر معادله بقای اندازه حرکت به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{d}{dx}\left(\alpha\frac{V^2}{2g}+\zeta\right)+(S_f-S_0)=0 \qquad (6)$$

$$\alpha=\frac{1}{V^3A}\int_A u_l^3 dA \qquad (7)$$

α ضریب اصلاح انرژی بدلیل توزیع غیریکنواخت سرعت در مقطع است. همانطور که در معادلات ارائه شده در این بخش مشاهده می‌شود، ترم آشفتگی به صورت ترم مجزایی در معادلات یک‌بعدی لحاظ نشده است. بمنظور لحاظ کردن اثر آشفتگی می‌توان از ضریب زبری مانینگ استفاده کرد. از آنجا که آشفتگی باعث افت در جریان می‌شود و در جریان یک‌بعدی اصطکاک کف و دیواره‌ها عامل افت است، می‌توان ضریب زبری مانینگ را طوری

اصلاح کرد که اثر آشفتگی نیز لحاظ شود.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial\left(\overline{U}H\right)}{\partial x}+\frac{\left(\overline{V}H\right)}{\partial y}=0 \qquad (8)$$

3- معادلات دوبعدی

اگر تغییرات پارامترهای هیدرولیکی در جهت قائم به اندازه کافی کم باشد که بتوان از آن صرفنظر کرد، معادلات حاکم برای جریان دوبعدی در پلان بدست می‌آید. بدین منظور می‌بایست از معادلات بر روی عمق انتگرال‌گیری کرد و اصطلاحاً معادلات متوسط گیری شده در عمق را بدست آورد. رابطه بقای جرم با فرض سیال تراکم ناپذیر و پیوسته به شکل زیر بدست می‌آید(Yousefi et al., 2010; Kuipers and Vreugdenhill, 1973):

که در آن ζ تراز سطح آب، $\overline{U}$ و $\overline{V}$ متوسط مقادیر u و v در عمق و H عمق ستون آب در هر المان است.

با انتگرال‌گیری از روابط بقای اندازه حرکت از سطح آب تا بستر، معادلات بقای اندازه حرکت انتگرال‌گیری شده در عمق بدست می‌آیند. با فرض بستر صلب و بدون لغزش و صرفنظر از تنش‌های سطح آزاد آب (مانند تنش ناشی از باد) معادلات مذکور به صورت زیر است(Yousefi et al., 2010; Kuipers and Vreugdenhill, 1973):

$$\frac{\partial\left(\overline{U}H\right)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\overline{U}\,\overline{U}H\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\overline{U}\,\overline{V}H\right)}{\partial y}=-gH\frac{\partial(\zeta)}{\partial x}+\frac{1}{\rho}\left[\frac{\partial\left(H\bar{\tau}_{xx}\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(H\bar{\tau}_{xy}\right)}{\partial y}-\tau_{xz}\Big|_{z_b}\right] \qquad (9)$$

$$\frac{\partial\left(\overline{V}H\right)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\overline{U}\,\overline{V}H\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\overline{V}\,\overline{V}H\right)}{\partial y}=-gH\frac{\partial(\zeta)}{\partial y}+\frac{1}{\rho}\left[\frac{\partial\left(H\bar{\tau}_{yx}\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(H\bar{\tau}_{yy}\right)}{\partial y}-\tau_{yz}\Big|_{z_b}\right] \qquad (10)$$

$$\bar{\tau}_{ij}=\upsilon\times\rho\left(\frac{\partial\overline{U}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\overline{U}_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}kS_{ij} \qquad (11)$$

$$\tau_{xz}\Big|_{z_b}=\rho\frac{g}{H^{\frac{1}{3}}}n^2\overline{U}\sqrt{\overline{U}^2+\overline{V}^2} \qquad (12)$$

$$\tau_{yz}\Big|_{z_b}=\rho\frac{g}{H^{\frac{1}{3}}}n^2\overline{V}\sqrt{\overline{U}^2+\overline{V}^2} \qquad (13)$$

معادله 9 معادله بقای اندازه حرکت در جهت x و معادله 10 معادله بقای اندازه حرکت در جهت y است.

$\bar{\tau}_{ij}$ تنش‌های برشی متوسط گیری شده در عمق، k انرژی آشفتگی متوسط عمقی (که بدلیل تاثیر کم در این تحقیق برابر صفر فرض شده است)، S_{ij} دلتای کرونیکر، $\tau_{xz}\Big|_{z_b}$ تنش برشی بستر در جهت x ، $\tau_{yz}\Big|_{z_b}$ تنش برشی بستر در جهت y ، υ لزجت سیال و n ضریب زبری مانینگ است. جهت محاسبه لزجت سینماتیکی از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$\upsilon=\upsilon_l+\upsilon_t \qquad (14)$$

$$\upsilon_l=1.14\times10^{-6}m^2s^{-1} \qquad (15)$$

$$\nu_t=0.15nH^{0.83}\sqrt{g(\overline{U}^2+\overline{V}^2)} \qquad (16)$$

$$\nu_t = (C_s)^2 \times \Delta \times \sqrt{\left(\frac{\partial \overline{U}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{V}}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{U}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{V}}{\partial x}\right)^2} \qquad (16\text{-الف})$$

υ_l لزجت سینماتیکی جریان آرام است که مقدار آن برای سیال آب با دمای 15 درجه مطابق رابطه 15 است (Streeter and Wylie, 1998). υ_t لزجت گردابی است که مقدار آن مطابق رابطه 16- الف پیشنهاد شده است (Fischer, 1973; Smagorinsky, 1963). در شبیه‌سازی جریان‌ها با گردابه‌های بزرگ پیشنهاد شده که از رابطه 16- ب که به رابطه اسماگورینسکی معروف است، استفاده گردد (Meyers and Sagaut, 2007). در رابطه مذکور ضریب $C_s = 0.1 \sim 0.8$ و پارامتر Δ مساحت سطح کنترل است. در این روش به جای متوسط گیری در زمان، از معادلات ناویراستوکس در مکان متوسط گیری می‌شود و به این ترتیب متوسط سرعت در یک محدوده مکانی (زیر شبکه) در نظر گرفته می‌شود. پس از متوسط گیری در مکان ترم‌هایی بوجود می‌آیند که نشان دهنده تاثیر گردابه‌های کوچکتر از اندازه شبکه بر جریان است. این ترم‌ها بصورت تنش بر جریان عمل می‌نمایند. اگر این تنش‌ها به صورت ساده‌ای به گرادیان‌های سرعت مربوط شوند، فرم نهایی معادلات شبیه به حالت متوسط زمانی (معادلات رینولدز) بدست می‌آید. با توجه به اینکه نوسانات سرعت در زمان در این روش در نظر گرفته می‌شود، لازم است معادلات (حتی در جریان‌های دائمی) در گام‌های زمانی خیلی کوتاه حل شده و بنابراین محاسبات به زمان بیشتری نیاز دارد. این روش در شرایط پیچیده (شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ[1]) به جواب‌های بهتری منجر می‌گردد. برخی محققین از این روش برای معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده در زمان هم استفاده کرده‌اند.

3-1- معادلات آشفتگی

اکثر جریان‌های موجود در طبیعت به صورت آشفته می‌باشند. در اعداد رینولدز بالا جریان آشفته است. یک حالت تصادفی از حرکت در جاییکه سرعت و فشار بطور پیوسته درون بخش‌های مهمی از جریان نسبت به زمان تغییر می‌کنند، گسترش می‌یابند. تاثیراتی که توسط آشفتگی ایجاد می‌گردد بسته به نوع کاربری ممکن است ظاهر نشود و به همین دلیل باید این جریان‌ها را با توجه به نوع و کاربری ان مورد بررسی قرارداد. انواع مدل‌های آشفتگی، ویسکوزیته گردابه‌ای و یا تنش رینولدز را تعیین می‌کنند و فرضیات زیادی بر آنها حاکم است که در یک تقسیم بندی به مدل‌های صفرمعادله‌ای (مدل لزجت گردابه‌ای ثابت، مدل طول اختلاط پرانتل و مدل لایه برش آزاد پرانتل)، یک معادله‌ای، دو معادله‌ای (ویسکوزیته گردابه‌ای، جبری و تنش رینولدز غیرخطی)، مدل‌های دارای معادله تنش و مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ تقسیم می‌شوند.

4- مدل‌های یک‌بعدی

این مدل‌ها به طور فراوان برای شبیه‌سازی تغییرات تراز بستر در مقیاس‌های بزرگ در رودخانه‌ها و خورها استفاده می‌شود. در مدل‌های یک‌بعدی مقادیر متوسط جریان و پارامترهای رسوب برای هر مقطع عرضی به عنوان تابعی از زمان و مکان مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مدل‌ها از یک مختصات طولی در جهت جریان به عنوان بعد مکانی استفاده می‌کنند. مقاطع عرضی برای تعریف هندسه کانال مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌های یک‌بعدی می‌توانند تغییرات تراز بستر عمودی را پیش‌بینی کنند. با توجه به معیارها و ویژگی‌های موثر در انتخاب مدل ریاضی مناسب مانند وجود مرجع علمی و راهنمای مدل، امکان حمایت و پشتیبانی فنی و علمی از مدل، کاربردوست بودن مدل، 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 و هزینه دستیابی به نرم‌افزار، کاربران تمایل به استفاده از نرم‌افزارهای مختلف

پیدا می‌کنند.

در میان مدل‌های یک‌بعدی با عنایت به میزان بالای موفقیت استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS در کاربردهای قبلی توسط دیگران (داخل و خارج کشور) و نیاز مبرم به بررسی اثر جریان بر پل‌ها در پروژه‌های راهسازی، شرح مفصل‌تری از این قابلیت‌های این نرم‌افزار در محاسبات جریان نزدیک پل‌ها ارائه می‌گردد.

جدول 1. مدل‌های یک‌بعدی پرکاربرد به همراه توضیحات کلی

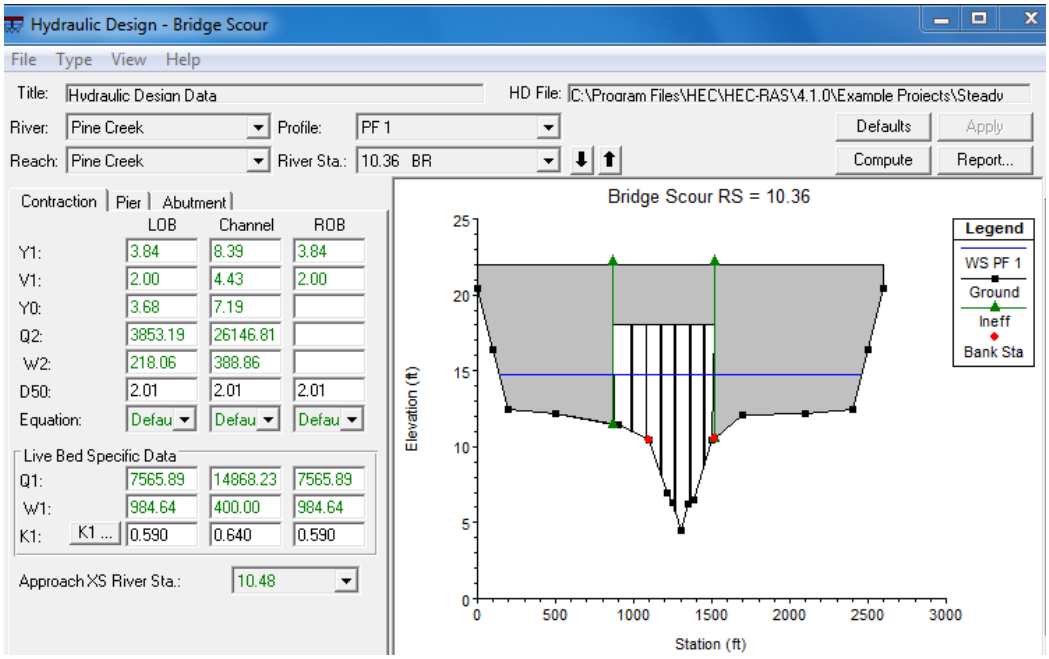
مدل	توضیحات
HEC-RAS	برای شبیه سازی جریان پایدار، جریان ناپایدار، محاسبه انتقال رسوب، مطالعات سیلاب، پل و کالورت، آبراهه‌های چند شاخه و آنالیز کیفیت آب استفاده می‌گردد. برای محاسبه پروفیل سطح آب جریان پایدار از حل یک بعدی معادله انرژی استفاده می‌شود. افت انرژی نیز توسط اصطکاک (معادله مانینگ)، بازشدگی‌ها و تنگ شدگی‌ها مدل می‌شود. استفاده از معادله ممنتوم زمانی رخ می دهد که سطح آب به سرعت تغییر کند که این امر می‌تواند در شرایطی شبیه به پرش هیدرولیکی اتفاق بیفتد. روش حل در این نرم افزار تفاضل محدود می باشد.
MIKE11	برای شبیه‌سازی یک‌بعدی جریان‌های پایدار و ناپایدار، انتقال رسوب، توزیع حرارت و آلودگی، مطالعات سیلاب و کالورت، پمپ و دریچه و شکست سد در رودخانه، مطالعات کانال و مخازن، مطالعات جزر و مدی در رودخانه‌ها و خورها و آنالیز کیفیت آب استفاده می‌گردد. قابلیت مدلسازی هندسه های طبیعی و پیچیده را دارد. مدل قادر به حل جریان های فوق بحرانی و زیر بحرانی می‌باشد. از روش تفاضل محدود ضمنی برای منقطع سازی معادلات استفاده می‌گردد.
HEC-6	هدف از تهیه این مدل، شبیه‌سازی واکنش‌های دراز مدت رودخانه همراه با حمل رسوب بوده است. در این مدل فرض می‌شود که آبشستگی یا رسوبگذاری در تمام قسمتهای متحرک بستر به صورت یکنواخت اتفاق می‌افتد. محاسبات رسوب برای هردسته از اندازه ذرات به صورت جداگانه انجام می‌شود. مدل دارای معادلات انتقال رسوب بسیاری است. یکی از محدودیت‌های این مدل آن است که دیواره‌های رودخانه به صورت پایدار و ثابت در محاسبات درنظر گرفته می‌شوند.
FLUVIAL -12	به منظور روندیابی جریان و رسوب در آبراهه‌های طبیعی و مصنوعی توسعه یافته است. در این مدل تصحیحی برای مقاومت جریان در نتیجه اثرات جریانهای ثانویه در آبراهه‌های دارای خم در نظر گرفته می‌شود. از این مدل می‌توا برای ارزیابی فرسایش عمومی در مقطع پل، حمل رسوب، عکس العمل آبراهه به برداشت شن و ماسه، کانالیزه کردن و.... استفاده کرد. مدل مذکور دارای پنج بخش روندیابی جریان، روندیابی رسوب، تغییرات در عرض آبراهه، تغییرات در پروفیل بستر آبراهه و تغییرات در هندسه آبراهه ناشی از انحنا است.
BRI-STARS	این مدل توانایی شبیه‌سازی رسوبگذاری و آبشستگی در رژیم‌های جریان زیر بحرانی، فوق بحرانی و مختلط را داراست. در این مدل تئوری کمینه نرخ استهلاک انرژی برای پیش‌بینی تغییرات عرضی رودخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد تا میزان کاهش یا افزایش عرض آبراهه تعیین گردد. بدین گونه که در مرحله اول با فرض لوله‌های جریان با مرز ثابت، رسوبگذاری یا آبشستگی در عرض کانال مشخص می‌شود. در این مرحله کاربر می‌تواند یک تابع از 7 تابع انتقال رسوب موجود در مدل را انتخاب نماید. در مرحله دوم الگوریتم کمینه‌سازی قدرت جریان مشخص می‌کند که در بعد جانبی آبراهه چه اتفاقی می‌افتد. بدین ترتیب این مدل قادر است در محل تنگ شدگی پل خصوصیات جریان، آبشستگی کف بستر و تغییرات عرضی رودخانه را شبیه‌سازی نماید.

RiverCad	از این نرم‌افزار جهت مدلسازی سیستم‌های رودخانه‌ای استفاده می‌گردد. محاسبات پروفیل سطح آب را به‌منظور مدل نمودن پل‌ها، کالورت‌ها، سرریزها و گوره‌ها انجام داده و قادر به نمایش خط مرز سیلاب و پهنه‌بندی سیلاب می‌باشد. با استفاده از این نرم‌افزار دیگر نیازی به صرف زمان به‌منظور تهیه فایل ورودی داده‌ها (استخراج مقاطع عرضی از روی نقشه توپوگرافی) و ارائه فایل خروجی (انتقال نتایج پس از شبیه‌سازی جریان برروی نقشه‌های توپوگرافی) نیست و کاربر به سادگی مقاطع عرضی را مستقیما از خطوط تراز نقشه توپوگرافی در محیط برنامه AutoCAD در فواصل دلخواه استخراج نموده و نهایتا پس از اجرای آنالیز پروفیل سطح آب، قادر به نمایش دقیق و تفسیر و تجزیه و تحلیل سریع آن می‌باشد. همچنین این بسته نرم‌افزاری قابلیت استخراج نتایج خروجی برنامه به محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی را فراهم می‌آورد(طباطبایی، 1385).
CCHE1D	جهت مدلسازی یک‌بعدی جریان غیرماندگار، انتقال رسوب و توزیع آلاینده‌ها در رودخانه‌های شاخه‌ای ارائه شده است. مدلسازی از طریق حل معادلات غیرخطی سنت ونانت به روش اختلاف محدود ضمنی و روش تقریبی موج دیفیوژن قابل انجام است. این نرم‌افزار قابلیت شبیه‌سازی سازه‌های هیدرولیکی مثل کالورت و پل‌های در مسیر رودخانه را داراست. مدل مذکور توانایی محاسبه انتقال رسوبات غیریکنواخت در رودخانه‌ها و آبراهه‌ها را دارا می‌باشد. این مدل، رسوب‌گذاری و فرسایش را همزمان با تغییرات ژئومتری مقاطع عرضی آبراهه‌ها، اندازه مواد بستر و فرسایش کناره‌ها را محاسبه می‌نماید. روندیابی انتقال رسوب CCHE1D باعث می‌شود این مدل برای مطالعات بلندمدت و کوتاه مدت قابل استفاده گردد. این مدل از امکانات نرم‌افزار ArcView در اطلاعات ورودی و خروجی و نمایش گرافیکی استفاده می‌کند.

4-1- پل‌ها در نرم‌افزار HEC-RAS

افت‌های جریان و پدیده آبشستگی از موارد مهم اثر متقابل پل و جریان است. افت‌های انرژی ایجاد شده توسط سازه‌هایی نظیر پل‌ها توسط HEC-RAS در سه بخش محاسبه می‌شوند. یک بخش شامل افت‌هایی است که در بازه بلافاصله در پایین‌دست سازه جایی که واگرایی جریان شکل می‌گیرد، رخ می‌دهد. بخش دوم شامل افت‌هایی است که در خود سازه رخ می‌دهند که می‌توان آن‌ها را با چندین روش مختلف مدل نمود. بخش سوم شامل افت‌هایی است که در بازه بلافاصله در بالادست سازه جایی که جریان بمنظور عبور از بازشدگی سازه همگرا می‌شود، رخ می‌دهد. محاسبات هیدرولیکی پل در شرایط جریان با دبی کم، جریان تحت فشار، جریان سرریز شونده و جریان ترکیبی انجام می‌شود (عزیزیان، 1393).

محاسبات آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی و آبشستگی موضعی در پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها انجام می‌پذیرد. ویرایش کنونی مدل امکان ارزیابی رسوب‌گذاری و کف‌کنی درازمدت را نمی‌دهد. رسوب‌گذاری و کف‌کنی درازمدت بایستی قبل از انجام تحلیل آبشستگی در پل انجام شود. محاسبات آبشستگی در پل با بازکردن پنجره Hydraulic Design Function و انتخاب تابع Scour at Bridges صورت می‌پذیرد. پس از انتخاب این گزینه، برنامه به‌طور خودکار به سراغ فایل خروجی رفته و خروجی محاسباتی مربوط به محل تقرب، مقطع درست بالادست پل و مقطع داخل پل را از آن قرائت می‌کند. پنجره طراحی هیدرولیکی برای آبشستگی در پل‌ها همانند شکل 1 پدیدار خواهد شد. زبانه‌های داده‌های ورودی برای آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی، آبشستگی در پایه پل و آبشستگی در تکیه‌گاه‌ها در دسترس می‌باشند.



شکل 1. پنجره طراحی هیدرولیکی برای آبشستگی در پل‌ها

آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی را می‌توان از معادله آب زلال لارسن (Laursen, 1963) یا معادله بستر متحرک (Laursen, 1960) محاسبه نمود. کلیه متغیرها به جز K1 (نمای معادله بستر متحرک که برای حالت انتقال مصالح بستر منظور می‌شود) و D50 مصالح بستر بطور خودکار از فایل خروجی بدست می‌آید. البته کاربر می‌تواند مقدار هر متغییر را با مقدار دلخواه خود تغییر دهد. برای محاسبه آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی، کاربر بایستی مقدار D50 (اندازه متوسط مصالح بستر) و دمای آب را برای محاسبه ضریب K1 وارد کند.

آبشستگی در پایه پل را می‌توان توسط معادله دانشگاه ایالتی کلرادو (CSU) (Richardson et. al., 1990) یا معادله فرولیچ (1988) محاسبه نمود. کاربر فقط بایستی شکل دماغه پایه (K1)، زاویه حمل جریان اصابت کننده به پایه‌ها، شرط بستر (K3) و اندازه D95 مصالح بستر را وارد کند. سایر مقادیر به طور خودکار از فایل خروجی برنامه استخراج می‌گردد. آبشستگی در تکیه‌گاه را می‌توان توسط معادله HIRE (Richardson et. al., 1900) یا معادله فرولیچ (Froehlich, 1989) محاسبه نمود (جبلی فرد و احمدی، 1392).

آبشستگی در تکیه‌گاه بطور مجزا برای تکیه‌گاه‌های سمت چپ و راست محاسبه می‌شود. کاربر فقط بایستی نوع تکیه‌گاه (قابل سرریز شدن، قائم، قائم با دیوارهای بالی شکل) را وارد کند.

برنامه بطور خودکار مقادیر کلیه متغیرهای دیگر را بر اساس خروجی هیدرولیکی و تنظیمات پیش‌فرض انتخاب می‌کند. با وجود این کاربر می‌تواند مقدار هریک از متغیرها را تغییر دهد. موقعیت پنجه تکیه‌گاه برمبنای محل تلاقی خاکریز راه با زمین طبیعی تعریف می‌شود.

این ایستگاه گذاری از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد زیرا متغیرهای هیدرولیکی مورد استفاده در محاسبات آبشستگی در تکیه‌گاه از خروجی توزیع جریان در این ایستگاه مقطع عرضی استخراج می‌شوند. اگر کاربر موافق ایستگاه‌گذاری انجام شده توسط مدل نباشد، می‌توانند مقدار دلخواه خود را جایگزین آن کند.

5- مدل‌های دوبعدی

در حالت دوبعدی دو نوع مدل استفاده می‌گردد. مدل‌های مذکور شامل مدل‌های دوبعدی قائم (2DV) و

مدل‌های دوبعدی افقی (2DH) است. مدل‌های دوبعدی قائم عمدتا برای برآورد انتقال رسوب معلق مورد استفاده قرار می‌گیرند. در اغلب موارد شرایط وضعیت‌های آب کم‌عمق، تغییرات قائم پارامترهای جریان کوچک است. در این حالت فقط توزیع افقی مقادیر متوسط‌گیری قائم بایستی تعیین شود. مدل‌های دوبعدی افقی برمبنای معادلات انتگرال‌گیری شده عمقی حرکت آب با روابط انتقال رسوب یا با یک مدل رسوب انتگرال‌گیری شده عمقی تلفیق می‌شوند.

در جدول 2 برخی از پرکاربردترین مدل‌های دوبعدی به همراه توضیحات کلی مربوطه ارائه شده است.

همانطور که پیشتر بدان اشاره شد، کاربران بنا به دلایل متعددی، تمایل به استفاده از مدل‌های فوق دارند. در میان مدل‌های دوبعدی، مدل CCHE2D بدلیل امکان استفاده آسان از آن و سیستم شبکه‌بندی منحنی الخط، مورد بررسی بیشتر قرار می‌گیرد.

1-5- مدل دوبعدی CCHE2D

ساخت هندسه و شبکه‌بندی میدان مطالعاتی در یک نرم‌افزار مجزای پیش‌پردازنده تحت عنوان CCHE-MESH صورت می‌گیرد. این مدل توانایی پشتیبانی از انواع اطلاعات هندسی را دارا بوده و از توابع مختلفی جهت تولید شبکه محاسباتی بهره می‌برد. حل میدان جریان و انتقال رسوب و همچنین مشاهده نتایج در محیط گرافیکی نرم افزار، CCHE-GUI انجام می‌شود(رستمی و عزیزیان، 1392).

پس از وارد نمودن اطلاعات هندسی، بایستی محدوده محاسباتی شبکه‌بندی گردد. روش‌های مختلفی برای ساخت شبکه محاسباتی وجود دارد. برای رودخانه‌های طبیعی با هندسه نامنظم، روش RL Orthogonal Mesh متداول‌ترین روش بوده و برای ساخت یک شبکه محاسباتی با کیفیت مناسب است(Zhang, 2005).

با تعیین نقاط ابتدا و انتهای مرزها، نوع مرز تعیین می‌گردد و مشخصات جریان ورودی و یا خروجی ارائه می‌گردد. در مرز ورودی میزان دبی به عنوان مقادیر مشخص جریان قابل ارائه است اما در مرز خروجی، می‌توان مرز باز، مقدار دبی و یا تراز سطح آب را تعیین کرد. شرط مرزی رسوب معلق و رسوب بستر به صورت فایل با فرمت مشخص قابل اعمال به مدل می‌باشد. با تنظیم شرایط مرزی و اولیه و دیگر پارامترها، شبیه‌سازی جریان صورت می‌پذیرد. برای مدلسازی آبشستگی، نیاز به مدلسازی رسوب وجود دارد. تعداد لایه‌های بستر، کمترین ضخامت اختلاط لایه‌های بستر و قطرهای دانه‌بندی تعیین می‌گردد. همچنین در این نرم‌افزار، پنج مدل آشفتگی برای مدلسازی جریان بکار می‌رود. این مدل‌ها عبارتند از مدل ویسکوزیته گردابه‌ای سهموی، مدل طول اختلاط، مدل K-ε، مدل For wind-Driven Flow و مدل اسماگورینسکی.

چهار تابع انتقال ایکرز و وایت اصلاح شده، انگلوند و هانسون اصلاح شده، وو و همکاران و رابطه SEDTRA جهت تحلیل فرایندهای رسوبی قابل استفاده است. نرم‌افزار جهت استفاده از روابط فوق از چندین حالت (Mode) می‌تواند استفاده کند. در حالت اول "بار کل به‌عنوان مجموع بار معلق و بار بستر"، شبیه‌سازی بار بستر و بار معلق به صورت همزمان به‌کار می‌رود. در حالت دوم " بار کل به‌عنوان بار بستر"، شبیه‌سازی بار بستر و بار معلق به کار می‌رود اما با این تفاوت که در این حالت بار بستر نسبت به بار معلق غالب می‌باشد. نظیر این حالت را می‌توان در رودخانه‌های مناطق کوهستانی که ساختار دانه-بندی درشت‌تر بوده و یا رودخانه‌های پرشیب وجود دارد، مشاهده نمود. در حالت سوم "بار کل به‌عنوان بار معلق"، شبیه‌سازی بار بستر و بار معلق به‌کار می‌رود، اما با این تفاوت که در این حالت بار معلق نسبت به بار بستر غالب می‌باشد. نظیر این حالت را می‌توان در رودخانه‌هایی با بستر ریزدانه که عمده رسوب به صورت بار معلق می‌باشد، مشاهده نمود. با انتخاب هرکدام از حالت‌های فوق می‌توان معادلات رسوبی را با توجه به شرایط موجود رودخانه

به‌کار برد. از طرف دیگر می‌توان یکی از دو روش تغییرات آهسته بستر بر مبنای جریان ماندگار و یا تغییرات سریع بستر برای جریان غیرماندگار بکار برد (رستمی و عزیزیان، 1392).

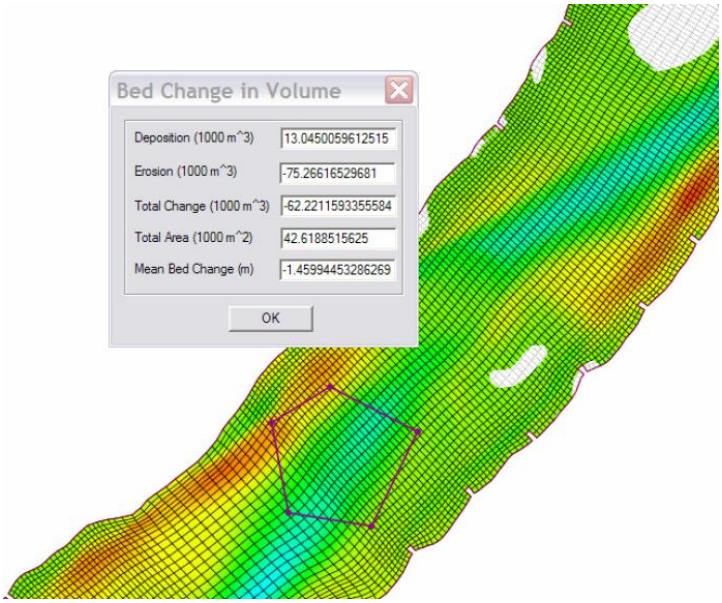
علاوه بر موارد فوق چگالی رسوبات تعیین می‌گردد و کاربر می‌تواند تاثیر انحنا مسیر رودخانه را بر نحوه انتقال رسوب و میزان جابجایی عرضی رودخانه در مدلسازی را لحاظ نماید. همچنین نمونه‌های رسوبی برای تعیین ترکیب اولیه مواد بستر در یک محدوده مشخص، تعیین می‌گردد و میزان تخلخل و درصد وزنی معادل هر قطر بیان می‌گردد.

برای نمایش نتایج حاصل از شبیه‌سازی رسوب به صورت گرافیکی باید نتایج رسوب بارگذاری گردد. پس از بارگذاری موفق نتایج رسوب، می‌توان تراز بستر، تغییرات بستر، توزیع غلظت بار معلق و بار بستر و ... را مشاهده کرد. برای نمایش نتایج رسوب می‌توان یک پلی‌گون را انتخاب کرد و اطلاعات آن پلی‌گون را دریافت کرد. در این حالت تخمینی از رسوب‌گذاری، فرسایش، تغییرات کل و میزان متوسط تراز بستر نمایش داده می‌شود (شکل 2).

جدول 2. مدل‌های دوبعدی پرکاربرد به همراه توضیحات کلی

مدل	توضیحات
CCHE2D	جهت مدلسازی دوبعدی جریان غیرماندگار و انتقال رسوب در رودخانه‌ها و کانال‌ها ارائه شده است. مدلسازی از طریق حل معادلات هیدرواستاتیک متوسط شده در عمق به روش المان محدود ضمنی با بهره-گیری از تکنیک اصلاح سرعت و ترکیب شبکه‌بندی عادی و متناوب انجام می‌گیرد. به طورکلی این مجموعه شامل دومدل جداگانه، CCHE2D Mesh Generator برای ساخت هندسه میدان محاسباتی و مدل CCHE2D-GUI که کلیه مراحل شبیه‌سازی در آن صورت می‌گیرد(جمشیدی و همکاران، 1393).
MIKE21	برای شبیه‌سازی هیدرولیک و عوامل محیطی نظیر رسوب چسبنده و غیرچسبنده، شوری، تغییرات دما و حرارت و آلودگی در دریاچه ها، خلیج ها، نواحی ساحلی و دریاها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار از روش تفاضل محدود بر شبکه منظم استفاده می‌کند. اما امکان ریز کردن شبکه محاسباتی در قسمت‌های مورد نیاز را نیز فراهم کرده است (کرمی و همکاران، 1385). مدل مذکور براساس کاربردهای اصلی هیدرولیک سواحل و اقیانوس‌شناسی، هیدرولیک محیطی، فرآیندهای رسوب و امواج توسعه یافته است. از قابلیت‌های این نرم‌افزار می‌توان به لحاظ نمودن تری و خشکی، استفاده از شبکه‌های مستطیلی، مثلثی و منحنی‌الخط متعامد، درنظر گرفتن نیروی کوریولیس، سرعت بالای محاسباتی به علت استفاده از الگوی حل مناسب و مدل‌سازی ریخت شناسی رودخانه اشاره کرد.
HEMAT	این نرم افزار قادر است انواع آنالیزهای جریان، رسوب و کیفیت آب را انجام دهد. ابزار جنبی لازم نظیر تولید شبکه و نمایش ورودی و خروجی به صورت گرافیکی در این مدل گنجانده شده است. مدل علاوه بر حل معادلات روی شبکه با سازمان چهار ضلعی ،امکان حل معادلات روی شبکه بی سازمان مثلثی و نیز شبکه تلفیقی مثلثی و مربعی را دارا می باشد. به دلیل امکان استفاده از شبکه بندی مثلثی، می توان در نقاط با گرادیان شدید، با توجه به دقت مورد نظر شبکه را کاملاً ریز نموده و در عین حال در سایر نقاط شبکه بندی درشت انجام داد. روش مورد استفاده مدل برای حل معادلات روش حجم محدود می‌باشد و اطلاعات مورد نیاز در هر سلول محاسباتی باتوجه به جهت انتشار موج تخمین زده می‌شود. مدل قادر به شبیه‌سازی جریانات مختلف تحت بحرانی، فوق بحرانی و نیز جریان‌های پیچیده تلفیقی تحت فوق بحرانی (نظیر شکست سد یا جهش هیدرولیکی) می باشد. محاسبات به صورت ابقایی انجام می‌گیرد و لذا نوسان عددی در مدل ناچیز می باشد. از دیگر قابلیتهای مدل می‌توان به استفاده از انواع مدلهای آشفتگی، استفاده از چندین رابطه برای انتقال

	رسوبات غیرچسبنده و مدل‌سازی تری و خشکی اشاره کرد.
TELEMAC-2D	جهت مدلسازی دوبعدی هیدرولیک دریا و رودخانه ارائه شده است. برنامه قابلیت مدلسازی انتشار موج بلند، اثرات ناشی از شتاب کریولیس و باد، اثرات درجه حرارت و شوری در جرم حجمی، وجود نواحی خشک در محدوده حل، پل و کالورت، انتقال رسوب و توزیع آلاینده‌ها دارد. منقطع سازی به دو روش المان محدود و حجم محدود صریح امکان‌پذیر است. میدان هندسی به صورت شبکه‌بندی ناساختدار و مثلثی منقطع‌سازی می‌گردد که قابلیت مدلسازی نواحی طبیعی را فراهم می‌کند. برای استفاده راحت‌تر از نرم‌افزار، برنامه‌هایی برای پیش پردازش و پس پردازش ارائه شده است. این مدل قابلیت مدلسازی جریان آب‌های زیرزمینی را نیز دارد.
HEC-RAS 5	در این نسخه از نرم‌افزار، مدل یک‌بعدی HEC-RAS به مدل دوبعدی که توانائی شبیه‌سازی دو بعدی جریان را دارا می‌باشد، ارتقا یافته است. در مدل جدید، کاربران قادر خواهند بود تا مدل خود را در حالت یک‌بعدی، دوبعدی (حل معادلات موج دینامیک یا معادلات موج پخشیدگی) و یا تلفیقی از هر دو حالت اجرا نمایند. ویژگی‌های این نرم‌افزار شامل مدلسازی یک‌بعدی، دوبعدی و یا ترکیبی از هر دو حالت، استفاده از معادلات موج دینامیک و یا موج پخشیدگی برای مدلسازی دوبعدی جریان، استفاده از الگوریتم حل مبتنی بر روش حجم محدود ضمنی، ترکیب الگوریتم‌های حل یک‌بعدی و دوبعدی، شبکه‌های محاسباتی دارای ساختدار و بدون ساختدار، پهنه‌بندی و ساخت انیمیشن از حرکت سیلاب، الگوریتم حل مبتنی بر چندین پردازشگر و قابلیت اجرا بر روی سیستم‌های 32 و 64 بیتی است (عزیزیان و صمدی، 1395).



شکل 2. انتخاب ناحیه‌ای برای مشاهده نتایج مدلسازی رسوب

6- نتیجه‌گیری

نکته‌ای که در مدلسازی بایستی حتما مدنظر قرار گیرد، ابعاد پروژه است. استفاده از نرم‌افزارهای پیچیده‌تر که قابلیت تحلیل جریان‌ها به صورت دوبعدی و یا سه‌بعدی را دارند برای تمام پروژه‌ها لازم نیست. از این رو تصمیم گرفته شد که بهترین نرم‌افزارها با توجه به ابعاد معادلات حاکم انتخاب گردد. از میان مدل‌های یک‌بعدی، مدل

HEC-RAS به طور فراوان برای شبیه‌سازی پروفیل سطح آب جریان پایدار، جریان ناپایدار، محاسبه انتقال رسوب و آنالیز کیفیت آب در مقیاس‌های بزرگ در رودخانه‌ها و خورها استفاده می‌شود. در این مدل مقادیر متوسط جریان و پارامترهای رسوب برای هر مقطع عرضی به عنوان تابعی از زمان و مکان در دبی‌های با دوره بازگشت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مدل بسیار ساده و در عین حال کاربردی است. چند شاخه‌ای شدن آبراهه‌ها را نیز در این مدل می‌توان تعریف کرد. علاوه بر این می‌توان در این مدل در صورت وجود هرگونه سازه‌های آبی شامل پل، بند، سد، آبگذر(کالورت) و .... آنرا به مدل تعریف و اضافه نمود و تاثیر آن را در روندیابی را مشاهده نمود. با توجه به جمیع جوانب، درصورتی که یک تحلیل کلی از یک منطقه بزرگ مدنظر باشد، استفاده از این نرم‌افزار بسیار سودمند خواهد بود. منظور از منقطه بزرگ اینست که بتوان غالب جریان را خطی در نظر گرفت. علیرغم اینکه این نرم‌افزار قابلیت بررسی پدیده‌های جزیی مانند اثرات پایه پل‌ها و کالورت‌ها نیز می‌باشد، اما در صورتی که جزییات پدیده برای پروژه مورد مطالعه از اهمیت بالایی برخوردار باشد، پیشنهاد می‌گردد که از نرم‌افزارهای دوبعدی و سه‌بعدی با توانایی بالاتر استفاده گردد. از طرف دیگر، درصورتیکه تغییرات پارامترهای هیدرولیکی در جهت قائم به اندازه کافی کم باشد که بتوان از آن صرفنظر کرد، معادلات حاکم برای جریان دوبعدی در پلان یا اصطلاحاً معادلات متوسط گیری شده در عمق، جنبه کاربردی پیدا می‌کند. یکی از این مدل‌ها، نرم‌افزار CCHE2D جهت مدلسازی دوبعدی جریان غیرماندگار و انتقال رسوب در رودخانه‌ها و کانال‌ها است. این مدل جزو مدل‌های هیدوردینامیکی دوبعدی بوده که برای حل میدان جریان از معادلات رینولدز متوسط گیری شده در عمق استفاده می‌کند و برای شبیه‌سازی جملات انتقال آشفتگی، دو مدل صفر معادله‌ای توزیع سهموی و مدل طول اختلاط لزجت گردابه‌ای و نیز مدل دو معادله‌ای k-ε را به‌کار می‌برد. مدل شبیه‌ساز پدیده انتقال رسوب این نرم‌افزار، توانایی مدلسازی انتقال هردو فاز بار معلق و بستر در حالت غیر تعادلی، غیریکنواخت و رسوب چسبنده و غیرچسبنده را دارد. همچنین این نرم-افزار تاثیر جریان‌های ثانویه برنحوه انتقال ذرات رسوب بار بستر در بازه‌های قوسی را درنظر می‌گیرد. با توجه به امکانات سخت افزاری و نرم‌افزاری موجود، استفاده از این نرم‌افزار در محدوده‌های پهن و با عمق کم در طول کوتاهی از رودخانه مقرون به صرفه است. استفاده از این نرم‌افزار در مطالعات پخش سیلاب در یک محدوده مشخص می‌تواند بسیار ثمربخش باشد. درخصوص بررسی پدیده‌های جزیی نیز تا جایی که غالب پدیده‌ها افقی باشند می‌توان از این نرم‌افزار استفاده نمود اما در مواردی که ماهیت اصلی جریان سه‌بعدی است بهتر است از نرم‌افزارهای قدرتمندتر استفاده نمود. به عنوان نمونه اگر هدف بررسی اثرات گردابه‌های افقی پشت کوله‌های پل باشد این نرم‌افزار با دقت خوبی می‌تواند راهگشا باشد اما بررسی دقیق پدیده آبشستگی در محل کوله کاملا دارای ماهیت سه‌بعدی است، بنابراین استفاده از این نرم‌افزار با تقریب بالایی همراه خواهد بود.

7- مراجع

- اسمعیلی ورکی، م.، زمانی، ا. و کاظمی راد، م. (1393)، "تحلیل شرایط هیدرولیکی جریان در بازه ای از رودخانه ناورد با استفاده از مدل‌های عددی CCHE2D و HEC-RAS"، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.
- جبلی فرد، س. و احمدی، ح. (1392)، "سیستم تحلیل رودخانه HEC-RAS"، جهاد دانشگاهی امیرکبیر.
- جمشیدی اشکلک، ر.، اسمعیلی ورکی، م. و فضل اولی، ر.، (1393)، "شبیه‌سازی عددی الگوی جریان حول سری آبشکن‌ها با استفاده از نرم‌افزار CCHE2D مطالعه موردی: رودخانه سفیدرود استان گیلان (محدوده شهرستان رودبار)"، سیزدهمین

کنفرانس هیدرولیکی ایران، تبریز.

- رستمی، م. و عزیزیان، ا.، (1392)، "آموزش کاربردی CCHE2D در مدلسازی هیدرودینامیک و انتقال رسوب مجاری باز"، انتشارات نوپردازان.
- رکمان‌زاده, م. و باقری، ع.، (1394)، "بررسی تاثیر پل بر سیل با استفاده از نرم افزار HEC-RAS و ArcGISمطالعه موردی: رودخانه بابلرود مازندران"، سومین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، تهران، موسسه آموزش عالی مهر اروند، گروه ترویجی دوستداران محیط زیست.
- زمان پور، س.، شفاعی بجستان م. و خام چین مقدم، ف. (1394)،"مدلسازی تاثیر حذف مئاندر بر الگوی جریان رودخانه با استفاده از نرم افزار CCHE2D مطالعه موردی: رودخانه کارون و حذف مئاندرهای چنیبیه و کریشان 2 واقع در پایین دست شهر اهواز"، اولین کنفرانس ملی روش های عددی در مهندسی عمران، مشهد.
- طباطبایی نائینی، ع. (1385)،"بررسی و کاربرد بسته نرم‌افزاری RiverCAD در مهندسی رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه پلاسجان در استان اصفهان)"، هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، بهمن، اهواز.
- عزیزیان، ا. و صمدی، ا.، (1395)، "شبیه‌سازی دوبعدی سیلاب در محیط مدل عددی HEC-RAS 5"، انتشارات دانشگاه بین المللی امام خمینی.
- عزیزیان، ا.، صمدی، ا. و آغاز، م.، (1393)، "مدلسازی جریان و رسوب در HEC-RAS"، انتشارات نوآور.
- کرمی خانیکی، ع.، گودرزی، م.، دهقانی، م. و موسوی، س.ف. (1385)،"کاربرد نرم افزار MIKE21 در روندیابی جریان رودخانه جزر و مدی زهره"، مجله آب و فاضلاب، شماره 60.
- موسوی، س. ف. و دانشفراز، ر.، (1394)، "پیش بینی عمق ابشستگی موضعی پایه‌های پل‌های روخانه هراز با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS"، همایش ملی استفاده از فناوری‌ها و تکنولوژی های نوین طراحی، محاسبه و اجرا در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی.
- همتی، م.، بیات، م. و سوری، ص.، (1394)، "شبیه‌سازی هیدرولیکی رودخانه چرداول با استفاده از مدل HEC-RAS"، سومین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری، تهران، دانشگاه شهید بهشتی.
- Chanson, H. (2004), Environmental Hydraulics of Open Channel Flows, Australia: Butter worth Heinemann.
- Fischer, H.B., (1973), “Longitudinal Dispersion and Turbulent Mixing in Open-Channel Flow”, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 5, pp 59-78, Inc., Paolo Alto, Calif.
- Froehlich, D.C., (1989), “Local Scour at Bridge Abutments”, Proceedings of the 1989 National Conference on Hydraulic Engineering, ASCE, New Orland, LA.
- Kamanbedast, A. A., Nasrollahpour, R., Mashal, M., (2013), “Estimation of Sediment Transport in Rivers Using CCHE2D Model (Case Study: Karkheh River)”, Vol. 6, Issue. 2, pp. 4112-4115.
- Kuipers, J. and Vreugdenhill, C.B., (1973), "Calculations of two-dimensional horizontal flow", Rep. S163, Part I, Delft Hydraulics Lab., Delft, The Netherlands.
- Laursen, E.M., (1960), “Scour at Bridge Crossing”, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 89, No. HY 3.
- Laursen, E.M., (1963), “An Analysis of Relief Bridges”, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 92, No. HY 3.
- Meyers, J., and Sagaut, P., (2007), “Evaluation of Smagorinsky variants in

equation-I. The basic experiment", Monthly weather review, 91, pp. 99-165.

- Stoker, J.J., 1957, Water Waves, the Mathematical Theory with Applications, Interscience, New York.
- Streeter, V.L., Wylie, B., (1998), "Fluid Mechanics", Mc- Graw Hill Press.
- Yousefi, S., Ghiassi, R., Yousefi, Sa., (2010), "Modeling and analyzing flow diversion in branching channels with symmetric geometry", River research and applications,Article first published online: DOI: 10.1002/rra.1393.
- Zhang, Yaoxin (2005), "CCHE2D Mesh Generator Users' Manual", NCCHE Technical Report.

large-eddy simulations of wall-resolved plane channel flows", Physics of fluids, Vol. 19. pp. 95- 105.

- Nishan Kumar Biswas, Muneer Ahammad, (2014), "Application of CCHE2D Mathematical Model in the Gorai Offtake for Two-Dimensional Simulation", International Journal of Surface and Groundwater Management, Vol. 01, No. 01.
- Richardson, E.V., Simons D.B. and Julian P., (1990), "Highways in the River Environment", FHWA-HY-90-016.
- Smagorinsky, J., (1963), "General circulation experiment with the primitive

Applying Numerical Models to Simulate the Behavior of Rivers in the Vicinity of Road

A. Mahjoob, Assistant Professor, Transportation Research Institute, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.
A. H. Abbasnia, Assistant Professor, Civil Engineering Department, Pardis Branch, Islamic Azad University, Pardis, Iran.
F. Kilanehei, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

E-mail: a.mahjoob@bhrc.ac.ir

Received: June 2016-Accepted: Sep. 2016

ABSTRACT
Construction, repair and maintenance of road and railroad infrastructures are very expensive. The exact knowledge of phenomena that damage the infrastructures, can help to manage the costs. One of the most important phenomena is flood. In recent decades, numerical modelings of occurred flood in the vicinity of roads and railways have been noted. In the present study, one and two-dimensional flow equations are presented and successful models in this field have been investigated. Among the presented models, two superior ones within one-dimensional and two-dimensional models are investigated more accurately and finally the proposed usages of these models are presented. One of the noticeable results is that one-dimensional models for overall analysis of a large area are very beneficial when dominant flow can be considered linearly. Although these models can calculate the effect of partial phenomena such as bridges and culverts, but if the details of these phenomenas are important for the project, it is suggested that the two-dimensional and three-dimensional softwares are used with higher capacity. Thus, using two-dimensional models such as CCHE2D, with ability of using different turbulence models and simulation the suspended load and bed load in non-equilibrium state, non-uniform and cohesion and non-cohesion sediments is appropriate. The use of introduced one and two-dimensional models for cases which are totally tree dimensional are not recommended.

Keywords: Numerical Modeling, Bridge, 1D and 2D Models, Flow in River, Scour

[1] Large Eddy Simulation