

ارزیابی کارآیی بسته‌های نرم‌افزاری مختلف در شبیه‌سازی جریان در زیر پلها

محمدتقی دستورانی^۱

(دریافت ۸۴/۶/۱۶ پذیرش ۸۵/۸/۱۷)

چکیده

این تحقیق در حقیقت یک بررسی مقایسه‌ای و مستقل در رابطه با تناسب و توانایی سه نرم‌افزار هیدرولیکی شناخته شده MIKE11، HEC-RAS و ISIS جهت شبیه‌سازی جریان در زیر سازه پلها است. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه مربوط به یک بررسی آزمایشگاهی است که قبلاً با استفاده از یک فلوم ۲۲ متری در دانشگاه بیرمنگهام انگلستان انجام شده است. دو نوع پل، شبیه‌سازی شد که یکی پل قوسی دو دهانه و دیگری پل مستقیم عرشه‌دار یا پل مدل US BPR با سه پایه بود. در شبیه‌سازی هر پل، دو جریان متفاوت تحت عنوان دبی کم و دبی زیاد مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاصل از نرم افزارها مقایسه و تجزیه و تحلیل گردیدند. جهت ارزیابی توانایی نرم‌افزارها نیمرخ سطح آب محاسبه شده توسط این نرم‌افزارها با مقادیر اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گرفت. هرچند هر دو نرم‌افزار قادر بودند که جریان در زیر پلهای قوسی و مستقیم عرشه‌دار را شبیه‌سازی کنند، لکن نتایج ارائه شده توسط آنها متفاوت بود. جهت شبیه‌سازی جریان در زیر پل قوسی، دو نرم‌افزار HEC-RAS و ISIS (خصوصاً HEC-RAS) توانایی و دقت بیشتری را نشان داد لکن نتایج حاصل از MIKE11 در این مرحله فاصله زیادی با نتایج آزمایشگاهی داشت. در رابطه با شبیه‌سازی جریان در زیر پل مستقیم عرشه‌دار، هر سه نرم افزار نتایج معقولی ارائه دادند؛ هر چند که نتایج حاصل از HEC-RAS در مقایسه با دو نرم افزار دیگر به مقادیر آزمایشگاهی نزدیک تر بود.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی جریان، جریان در زیر پلها، نرم‌افزار، مدل‌سازی هیدرودینامیکی، پل، MIKE11، ISIS، HEC-RAS

Evaluation of Different Software Packages in Flow Modeling under Bridge Structures

Mohammad Taghi Dastorani¹

(Received Sep. 7, 2005 Accepted Nov. 8, 2006)

Abstract

This study is an independent and a comparative research concerning the accuracy, capability and suitability of three well-known packages of ISIS, MIKE11 and HEC-RAS as hydraulic river modeling software packages for modeling the flow through bridges. The research project was designed to assess the ability of each software package to model the flow through bridge structures. It was carried out using the data taken from experiments completed by a 22-meter laboratory flume at the University of Birmingham. The flume has a compound cross section containing a main channel and two flood plains on either side. For this study a smooth main channel and a smooth floodplain have been assumed. Two types of bridges are modeled in this research; a multiple opening semi-circular arch bridge and a single opening straight deck bridge. For each bridge, two different simulations were carried out using two different upstream boundaries as low flow and high flow simulations. According to the results, all three packages were able to model arch and US BPR bridges but in some cases they presented different results. The highest water elevation upstream the bridge (maximum afflux) was the main parameter to be compared to the measured values. ISIS and HEC-RAS (especially HEC-RAS) seem to be more efficient to model arch bridge. However, in some cases, MIKE 11 produced considerably higher results than those of the other two packages. To model USBPR bridge, all three packages produced reasonable results. However, the results by HEC-RAS are the best when the outputs are compared to the experimental data.

Keywords: Flow Modeling, Under Bridge Flow, Software Packages, Hydrodynamic Modeling, Bridge, ISIS, MIKE11, HEC-RAS.

1- Assistant Prof., Natural Resources Department, Yazd University, mdastorani@yazduni.ac.ir

۱- استادیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد، mdastorani@yazduni.ac.ir

طراحی و اجرا می‌شود [۸]. مدل‌های کامپیوتری یک بُعدی اصولاً ابزار مناسب برای حل بسیاری از مسائل مربوط به جریان رودخانه خصوصاً رودخانه‌هایی که دارای بستر طویل و نسبتاً همگن می‌باشند، است؛ هر چند در این میان استثنائاتی نیز وجود دارد. سه نرم‌افزار شناخته شده جهت مدل‌سازی یک بُعدی جریان عبارت‌اند از: ISIS (مرکز تحقیقات هیدرولیکی والینگفورد و کمپانی هالکرو در انگلستان)^۱، MIKE11 (مؤسسه هیدرولیک دانمارک)^۲ و HEC-RAS (گروه مهندسی ارتش آمریکا)^۳. هر یک از این نرم‌افزارها روش خاصی را جهت حل معادلات جریان مورد استفاده قرار می‌دهند و لذا جهت بررسی وضعیت هیدرولیکی جریان در سازه‌های مختلف و از جمله پلها روش ویژه خود را دارند. این مقاله توانایی هر یک از این سه نرم‌افزار را در شبیه‌سازی جریان در زیر دو نوع پل متفاوت در مواقع دبی کم و دبی زیاد مورد ارزیابی قرار می‌دهد. نتایج حاصل از این نرم‌افزارها با یکدیگر و نیز با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه مورد مقایسه و تحلیل و بحث شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- تشریح عوامل و ابعاد

در این تحقیق از داده‌های حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی روی مدل فیزیکی ساخته شده در یک فلوم ۲۲ متری در دانشگاه بیرمنگام انگلستان استفاده گردیده است [۹]. این فلوم دارای یک سطح مقطع مرکب است که یک کانال اصلی در وسط و دو دشت سیلابی در دو طرف آن قرار گرفته است. این داده‌ها حاصل بخشی از آزمایش‌های مفصلی است که در یک پروژه تحقیقاتی و با استفاده از این فلوم انجام شده که در آن علاوه بر به‌کارگیری شکلهای متفاوت پل، مقادیر متفاوت دبی و نیز وضعیت مختلف زبری کف و کناره‌های کانال نیز مورد استفاده واقع شده است. لازم به ذکر است که قبل از شروع تحقیق حاضر با مشورتی که با محققان طرح مزبور انجام گرفت از دقت و صحت و تناسب داده‌های مذکور جهت استفاده در این تحقیق (جهت مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی) اطمینان حاصل شد. شکل ۱ نمایی از مقطع این فلوم را نشان می‌دهد.

در این تحقیق فلوم با بستر هموار و زبری کم استفاده شد و دو نوع پل متفاوت مورد شبیه‌سازی قرار گرفت که عبارت‌اند از:

- پل قوسی (با دو دهانه)

در طراحی یک پل روی رودخانه علاوه بر محاسبات و بررسی‌های سازه‌ای، بررسی دقیق وضعیت هیدرولیکی جریان در محل سازه و برآورد کمیتهای هیدرولیکی مثل تغییرات دبی و ارتفاع آب، رسوبگذاری و آبستگي و نیز نیروهای هیدرودینامیکی و به‌طور کلی شناخت عواملی که بر پایداری آبراهه حاکم هستند، امری ضروری است. پدیده‌های فرسایش و وقوع دبی‌های سیلابی عوامل اصلی خسارت و تخریب پلها در تمامی نقاط جهان هستند و مطالعه و بررسی هیدرولیکی این عوامل نیز در حقیقت نکات کلیدی در پایداری این نوع سازه‌هاست [۱]. علاوه بر آن، بسیاری از سیلابهای مخرب و خسارت‌بار در نقاط مختلف جهان در اثر بنای پلهایی به وقوع پیوسته که در طراحی و ساخت آنها عوامل و خصوصیات هیدرولیکی به خوبی مطالعه و بررسی نشده است [۲].

پلهای زیادی هر ساله در سراسر جهان تخریب می‌شوند که اغلب نه به دلایل سازه‌ای، بلکه به دلیل در نظر نگرفتن نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی پلها می‌باشد. جهت ارزیابی دقیق این عوامل و بهینه‌سازی طراحی، استفاده از مدل، روشی معمول و رایج می‌باشد [۳]. در این حالت، اطلاعات مورد نیاز جهت ساخت مدل از محل پروژه اصلی برداشت می‌شود و سپس نتایج حاصل از مطالعه بر روی مدل، جهت طراحی پروژه اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل می‌تواند یک مدل ریاضی، فیزیکی و یا کامپیوتری باشد. مدل‌های فیزیکی هر چند دقت قابل ملاحظه‌ای دارند، لکن اغلب پرهزینه و وقت‌گیر هستند. امروزه مدل‌های کامپیوتری جهت حل بسیاری از مسائل مربوط به مهندسی رودخانه، روشی رایج تلقی می‌شود که غالباً کارایی مناسبی را نیز از خود نشان داده است. به همین علت، نرم‌افزارهای متعددی نیز در این زمینه تهیه گردیده است که در نقاط مختلف دنیا مورد استفاده قرار گرفته و در بسیاری موارد نیز نتایج خوبی ارائه داده است [۴ و ۵]. مسئله مهمی که باید در این زمینه مورد توجه قرار گیرد اطمینان از کارایی این نرم‌افزارها و اعتماد کافی به نتایجی است که توسط آنها جهت طراحی در شرایط مختلف ارائه می‌شود؛ این امر میسر نیست، مگر با انجام تحقیقات لازم در این زمینه و مقایسه نتایج آنها با یکدیگر و نیز با نتایج واقعی و یا آزمایشگاهی.

جریان آب در رودخانه به عنوان یک کانال باز طبیعی، تحت تأثیر عوامل متعددی قرار گرفته و به همین علت بررسی و تحلیل آن نیز از پیچیدگی خاصی برخوردار است [۶ و ۷]. هر چند جریان آب در رودخانه و دشتهای سیلابی سه بُعدی است، لکن در اغلب موارد و برای بیشتر کاربردها مدل کامپیوتری سه بُعدی بیش از حد پیچیده و وقت‌گیر می‌باشد و لذا حالت میانگینی برای عمق و سطح در نظر گرفته می‌شود و در نتیجه یک مدل یک بُعدی برای آن

¹ Halcrow /Wallingford Software

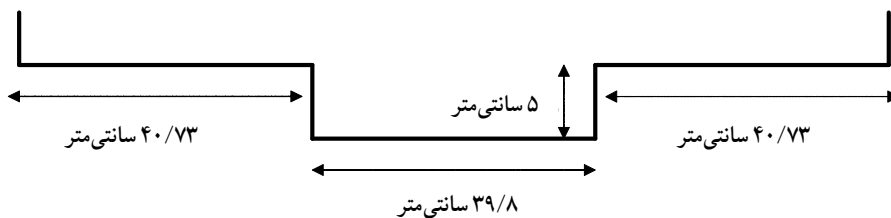
² DHI Water and Environment

³ US Army Corps of Engineers

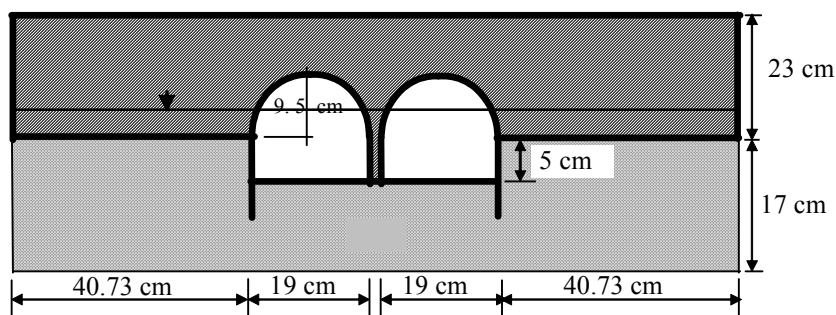
شکل ۲، ابعاد مربوط به این نوع پل را نشان می‌دهد. شبیه سازی این پل با دو مقدار مختلف دبی جریان تحت عنوان جریان کم (۲۰/۹۷ لیتر در ثانیه) و جریان زیاد (۳۴/۴۳ لیتر در ثانیه) انجام گرفته است.

- پل مستقیم عرشه دار با سه پایه
ابعاد این پل در شکل ۳ نشان داده شده است. برای این پل نیز دو شبیه‌سازی متفاوت با استفاده از دو مقدار مختلف دبی جریان تحت عنوان جریان کم و جریان زیاد انجام شده است.

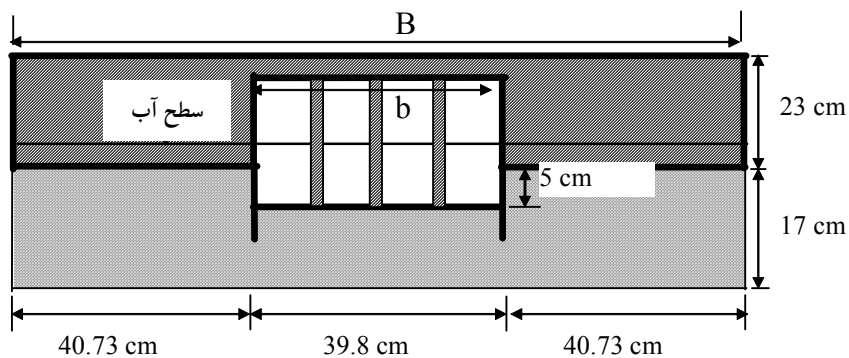
شکل ۱- نمایی از مقطع فلوم استفاده شده در این تحقیق



شکل ۲- مقطع پل قوسی با دو دهانه



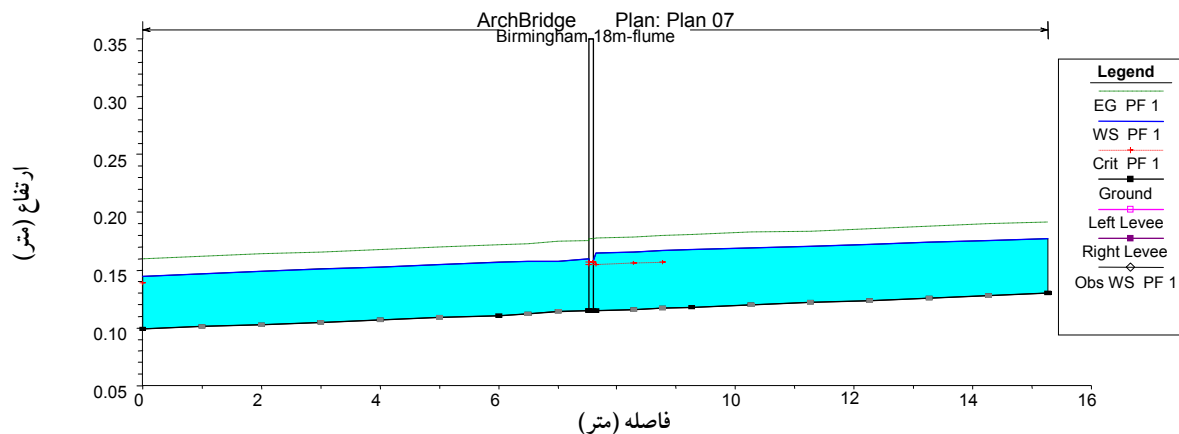
شکل ۳- مقطع پل مستقیم عرشه دار با سه پایه



جدول ۱- مشخصات نرم افزارهای استفاده شده در این تحقیق

جدول ۱- مشخصات نرم افزارهای استفاده شده در این تحقیق

نرم افزار	نسخه (Version)	تولید کننده
ISIS	۲ (ژانویه ۲۰۰۱)	مرکز تحقیقات هیدرولیکی والینگفورد و کمپانی هالکرو در انگلستان
MIKE11	۵-۰۵۲ (۲۰۰۱ b)	مؤسسه هیدرولیک دانمارک
HEC-RAS	3.1.0(Beta) (فوریه ۲۰۰۱)	گروه مهندسی ارتش آمریکا



شکل ۴- مقطع طولی فلوم به همراه موقعیت مقطعیها

است. این نرم افزار قادر است هر دو نوع جریان ماندگار و غیر ماندگار را شبیه سازی نماید. ISIS روشی کاملاً دینامیکی را جهت حل عددی معادلات سن ونان^۲ به کار می گیرد که در آن از روش صریح پریسمن با شبکه های ۴ نقطه ای استفاده می شود.

ISIS محاسبات مربوط به ارتفاع حداکثر آب زیر پل قوسی را با استفاده از روشی که توسط مرکز تحقیقات هیدرولیک والینگفورد ارائه شده است انجام می دهد. این روش براساس نتایج حاصل از مدل های فیزیکی در آزمایشگاه تنظیم شده و سپس با استفاده از داده های مربوط به پلهای موجود در انگلستان مورد آزمون و صحت یابی قرار گرفته است. ارتفاع حداکثر آب زیر پلهای قوسی یک دهانه و چند دهانه در این روش به صورتی مورد محاسبه قرار می گیرد که جزئیات آن در گزارشی تحت عنوان "افلاکس در پلهای قوسی"، تشریح گردیده است [۱۰]. لازم به ذکر است که در این روش، سطح زیر هر یک از دهانه ها از کف و نیز از سطح ابتدای شروع قوس^۳ با این فرض که شکل قوس سهموی است محاسبه می گردد [۱۰]. جریان مربوط به جاده بالای پل و نیز مجاری مربوط به سیلاب (زیر گذر سیلاب) در این روش در نظر گرفته نمی شود، اما در صورت لزوم می توان واحدهای شبیه سازی مربوط به سرریز و زیرگذر که در نرم افزار موجود است را به منظور پوشش دادن این موارد به مدل اضافه کرد.

در مورد پلهای مستقیم عرشه دار، ISIS روشی را جهت محاسبه ارتفاع حداکثر آب زیر پل به کار می گیرد که در کتاب هیدرولیک آبراهه های پل تشریح گردیده است [۱۱]. در این روش لازم است که یک سطح مقطع در بالادست پل (ترجیحاً جایی که حداکثر پس زدگی آب را داریم) و یک سطح مقطع نیز در پایین دست پل

شرایط مرزی پایین دست (آخرین سطح مقطع در فلوم) در وضعیت "عمق نرمال" قرار داده شد. شش عدد سطح مقطع اندازه گیری شده در فواصل ۰، ۶، ۷/۳۶، ۷/۴۹، ۹ و ۱۵ متر از ابتدای فلوم تعریف شد که مقاطع ۷/۳۶ و ۷/۴۹ به ترتیب بلافاصله در بالا دست و پایین دست پل قرار گرفته بودند. جهت اندازه گیری نیمرخ سطح آب در نقاط بیشتر، خصوصاً بالا دست و پایین دست پل، تعدادی سطح مقطع اضافی نیز با استفاده از روش میان یابی در نظر گرفته شد.

جهت انجام شبیه سازیها سعی گردید، که از آخرین نسخه نرم افزارها که در زمان شروع تحقیق موجود بود، استفاده گردد و تا پایان تحقیق تعویضی در نسخه استفاده شده صورت نگیرد. جدول ۱ مشخصات این نرم افزارها را نشان می دهد.

همان طور که اشاره شد، علاوه بر شش سطح مقطع اندازه گیری شده مزبور، ۱۴ سطح مقطع دیگر نیز به صورت میان یابی به مدل اضافه گردید. در قسمت بالادست و پایین دست فلوم، سطح مقطعیها با فواصل یک متر در نظر گرفته شد، در حالی که در قسمت میانی فلوم و در طول حدود ۳ متر که سراب و پایاب پل را شامل می شود، سطح مقطعیها با فواصل نیم متری به مدل داده شد (شکل ۴).

۲-۲- ساخت مدل در نرم افزار ISIS

ISIS یک نرم افزار کامپیوتری است که جهت شبیه سازی و حل مسائل مختلف مربوط به هیدرولیک جریان در حالت یک بعدی مورد استفاده واقع می شود و خود از زیر برنامه های متفاوتی تشکیل شده است. این نرم افزار به صورت مشترک توسط مرکز تحقیقات هیدرولیک والینگفورد^۱ و کمپانی هالکرو در انگلستان تولید شده

² St. Venant Equations

³ Springing Level

¹ HR Wallingford

ترجیحاً جایی که جریان به حالت عمق نرمال می‌رسد) در مدل تعبیه شده باشد. جهت محاسبات سطح پس زدگی آب در بالادست پل در یک پل مستقیم عرشه دار از رابطه ۱ استفاده می‌شود

$$h = ka_2 \frac{V_B^2}{2g} + a_1 \left[\left(\frac{A_B}{A_4} \right)^2 - \left(\frac{A_B}{A_1} \right)^2 \right] \frac{V_B^2}{2g} \quad (1)$$

که در آن:

h : پس زدگی کلی، k : ضریب مربوط به پس زدگی کلی،
 a_1 : ضریب انرژی جنبشی در مقطع بالادست، a_2 : ضریب انرژی جنبشی در مقطع فشرده شده (جایی که عرض رودخانه به علت ساختمان پل کم شده)، g : شتاب جاذبه (9.81 m/s^2)،
 V_B : میانگین سرعت در مقطع فشرده شده، A_B : سطح مقطع جریان در مقطع فشرده شده، A_4 : سطح مقطع جریان در مقطع پایین دست و A_1 : سطح مقطع کلی جریان در مقطع بالادست است که مقدار حاصل از پس زدگی را نیز در بر می‌گیرد. جریان احتمالی سرریز شده از بالای پل در این حالت مدنظر قرار نگرفته و در صورتی که چنین وضعیتی حاکم باشد لازم است که یک واحد مربوط به مدل‌سازی سرریز (که در نرم افزار موجود است) به موازات پل به مدل افزوده گردد [۱۰].

۲-۳- ساخت مدل در نرم افزار MIKE11

نرم افزار MIKE11 که توسط مؤسسه هیدرولیک دانمارک تولید شده است، در واقع یک نرم افزار حرفه‌ای مهندسی جهت شبیه سازی جریان، کیفیت آب و انتقال رسوب در مصیها، رودخانه‌ها و کانال‌های آبیاری است. این نرم افزار اساساً یک ابزار جهت شبیه سازی یک بُعدی به منظور طراحی، مدیریت و اجرا در سیستم‌های رودخانه‌ای ساده و پیچیده است و در آن سه روش مجزا جهت تحلیل جریان تعبیه شده که کاربر بنا به شرایط مسئله می‌تواند آنها را انتخاب نماید [۱۱]. این سه روش عبارت‌اند از:

- روش موج دینامیکی

در این روش معادله کامل ممنتم که در برگیرنده نیروهای شتاب دهنده نیز می‌باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد. این حالت شرایط را جهت شبیه سازی جریان هنگامی که دارای تغییرات سریع است و نیز هنگامی که حالت جزر و مدی حاکم است تسهیل می‌نماید. همچنین در این حالت محاسبات مربوط به نیمرخ پس زدگی آب به راحتی انجام می‌گیرد. انتخاب این روش زمانی مناسب است که تغییرات اینرسی جریان در زمان و مکان مهم است و نیز در مواردی که نیاز به شبیه سازی جریان جزر و مدی است و همچنین برای رودخانه‌هایی که شیب سطح آب، شیب کف و مقاومت بستر کوچک می‌باشد [۱۲].

- روش موج انتشار (پخش شونده)

این روش، شبیه سازی مربوط به اصطکاک بستر، نیروی جاذبه و عوامل گرادیان هیدرولیکی در معادله ممنتم را شبیه سازی می‌کند. در این روش، اثرات پس زدگی آب نیز شبیه سازی می‌شود و کاربرد اجازه دارد تا شرایط پایین دست را مورد بررسی قرار دهد. از آنجا که این روش از عوامل اینرسی چشم پوشی کرده، لذا می‌تواند جهت تحلیل پس زدگی آب مناسب باشد. همچنین در مواردی که نیروهای مربوط به مقاومت بستر مهم هستند و یا در حالتی که انتشار آرامی از موج سیل اتفاق می‌افتد و می‌توان از تغییرات اینرسی چشم پوشی کرد، مناسب می‌باشد.

- روش موج سینماتیکی

این روش، محاسبات جریان را بر اساس فرض تعادل بین نیروهای اصطکاک و جاذبه انجام می‌دهد. این روش برای رودخانه‌های با شیب زیاد بدون اثرات پس زدگی آب مناسب است چرا که قادر به شبیه سازی اثرات پس زدگی آب نمی‌باشد [۱۲]. بخش هیدرودینامیکی MIKE11 که در آن روش موج دینامیکی انتخاب شده باشد، معادله ممنتم و پیوستگی (معادلات سن ونان) را با اعمال فرضیاتی حل می‌کند. حل این معادلات بر اساس روش تفاضل محدود صریح انجام می‌شود.

برای محاسبات جریان در پل قوسی دو روش در MIKE11 تعبیه شده است که عبارت‌اند از روش بایری و دلور^۲ و روش مؤسسه تحقیقات والینگفورد. در روش بایری و دلور ارتفاع آب در مقطع بالا دست و مقطع پایین دست پل مورد استفاده قرار می‌گیرد. دبی جریان بر اساس عمق بالادست از رابطه ۲ محاسبه می‌شود

$$Q = 0.7083 C_D (2g)^{1/2} Y_{us}^{3/2} \times b \left[1 - 0.1294 \left(\frac{Y_{us}}{r} \right)^2 - 0.0177 \left(\frac{Y_{us}}{r} \right)^4 \right] \quad (2)$$

که در آن:

C_D : ضریب مربوط به دبی، g : شتاب جاذبه (9.81 m/s^2)،
 Y_{us} : عمق جریان که در برگیرنده پس زدگی بالادست پل نیز باشد،
 b : عرض دهانه در محل شروع قوس^۳، به متر و r : شعاع انحنا قوس به متر است. لازم به ذکر است که در این حالت قوس پل به صورت نیمدایره و مقطع کانال رودخانه به صورت مستطیلی در نظر گرفته می‌شود و عمق آب محاسبه می‌گردد.

در مورد پل‌های مستقیم عرشه دار، نرم افزار MIKE11 محاسبات مربوط به سطح آزاد جریان را با فرض شرایط عمق نرمال انجام می‌دهد. در این حالت حداکثر ارتفاع آب، H_1 ، در

¹ MIKE11 HD

² Biery and Delleur

³ Spring Line

مقطع بالادست پل با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود

$$H_1 = k^* \frac{a_2 V_{N2}^2}{2g} + a_1 \left[\left(\frac{A_{N2}}{A_4} \right)^2 - \left(\frac{A_{N2}}{A_1} \right)^2 \right] \frac{V_{N2}^2}{2g} \quad (3)$$

که در آن:

k^* : ضریب پس زدگی کلی، V_{N2} : سرعت متوسط در سطح مقطع پل در عمق نرمال، A_{N2} : سطح مقطع جریان در حالت عمق نرمال، A_1 : سطح مقطع جریان در مقطع ۱ (بالادست پل)، A_4 : سطح مقطع جریان در مقطع ۴ (پایین دست پل)، g : شتاب جاذبه (9.81 m/s^2)، a_1 : ضریب توزیع سرعت و a_2 : ضریب توزیع سرعت است.

برای حالتی که سطح جریان با قسمت سقف دهانه پل در تماس کامل است، در حقیقت جریان در حالت سطح آزاد نبوده و تحت فشار محسوب می‌گردد. در این حالت MIKE 11 معادلات دیگری را جهت محاسبه جریان در زیر پل مورد استفاده قرار می‌دهد که اطلاعات بیشتر در این مورد در مرجع ۶ موجود است.

۲-۴- ساخت مدل در نرم افزار HEC-RAS

نسخه اخیر HEC-RAS که در این تحقیق استفاده شده توسط بخش تحلیل رودخانه در مرکز مهندسی هیدرولوژی گروه مهندسی ارتش آمریکا ارائه شده است. این نرم افزار قادر است شبیه سازی یک بُعدی جریان ماندگار و غیرماندگار و نیز محاسبات نیمرخ سطح آب در حالت زیر بحرانی، فوق بحرانی و نیز رژیم جریان مخلوط^۱ را انجام دهد [۱۳]. این نرم افزار جهت انجام محاسبات هیدرولیکی جریان یک بُعدی برای سیستم کامل رودخانه های طبیعی و کانال های دست ساز طراحی شده است [۱۴]. در HEC-RAS فرآیند اصلی محاسبات بر یک روش حل یک بُعدی معادله انرژی استوار است. معادله انرژی از یک سطح مقطع به سطح مقطع بعدی با استفاده از روش گام به گام استاندارد جهت محاسبه نیمرخ سطح آب حل می‌شود. این نرم افزار همچنین هدر رفت انرژی در اثر اصطکاک (به وسیله معادله مانینگ) و نیز در اثر کم و زیاد شدن عرض رودخانه را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. برای حالتی که آب بالا آمده و به سقف دهانه پل برخورد می‌نماید، پس زدگی آب اتفاق می‌افتد و در حقیقت جریان تحت فشار می‌باشد. در این حالت، نرم افزار محاسبات را برای دو حالت انجام می‌دهد. حالت اول، زمانی است که سقف دهانه پل فقط در تماس با آب قرار می‌گیرد و حالت دوم، زمانی است که از این حد نیز گذشته و دهانه پل تماماً پر است و حالت غرقاب دارد. برای حالتی که جریان روی پل سرریز می‌کند یا به عبارت دیگر جاده روی پل را اشغال می‌کند،

معادله استاندارد سرریز جهت محاسبه جریان این قسمت استفاده می‌شود. در حالتی که جریان بیشتر از حد، بالا می‌آید نیز نرم افزار به طور اتوماتیک وضعیت غرق شدگی سرریز را در محاسبات دخالت می‌دهد. در این حالت نرم افزار خود به خود وارد محاسبات هدر رفت انرژی بر اساس معادله انرژی می‌شود [۱۴].

بدیهی است که کالیبراسیون مدل در رابطه با پارامترهایی که نیاز به کالیبراسیون دارد بسیار مهم است. کالیبراسیون مدل در حقیقت برآورد و بهینه سازی مقادیر مربوط به پارامترهای مدل با توجه به شرایط مورد استفاده است به طوری که مدل با آن شرایط سازگاری پیدا کند. در این حالت غالباً از مقادیر اندازه گیری شده در طبیعت و یا آزمایشگاه استفاده می‌گردد و سعی می‌شود با بهینه سازی مقدار پارامترهای مدل، خروجی مدل به مقادیر مشاهده شده (اندازه گیری شده) نزدیک تر گردد. در تحقیق حاضر با توجه به اینکه از یک فلوم آزمایشگاهی استفاده شده که شرایط مربوط به مقطع در تمام قسمتهای آن یکسان بوده و از طرف دیگر، جریان ماندگار در نظر گرفته شده است، کالیبراسیون مدل پیچیدگی زیادی نخواهد داشت. در این تحقیق، پس از ساخت مدل در نرم افزارهای مختلف سعی گردید پارامترهای مورد استفاده در مدل، خصوصاً وضعیت زبری و زبری معادل برای کف و کناره های کانال، شرایط مربوط به پایاب فلوم و همچنین ضرایب مربوط به معادلات استفاده شده در نرم افزارها جهت محاسبه عمق و دبی جریان با دقت کافی برآورد و به مدل داده شود. به این منظور، از داده های اندازه گیری در فلوم مذکور استفاده گردید، بدین صورت که پس از شبیه سازی فلوم در هریک از نرم افزارها و قبل از قرار دادن سازه پل در آنها با وارد کردن دبی جریان ورودی و تنظیم پارامترهای مدل خروجی، مدل به مقادیر اندازه گیری شده در پایاب بسیار نزدیک گردید و بدین وسیله مدل با شرایط فلوم سازگار شد.

۲-۵- اجرای مدل

در مدل های مربوط به پل قوسی و پل مستقیم عرشه دار، دو شبیه سازی با استفاده از دبی جریان کم و دبی جریان زیاد انجام شد. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، وضعیت پایاب فلوم در حالت عمق نرمال قرار گرفت. در نرم افزار ISIS داده های پایاب فلوم برای حالت عمق نرمال توسط خود نرم افزار تولید می‌شود. در نرم افزار MIKE 11، امکان ایجاد داده های مربوط به عمق نرمال برای پایاب فلوم با استفاده از خود نرم افزار امکان پذیر نیست، لذا این مقادیر به صورت دستی محاسبه گردید و در مدل وارد شد (با استفاده از رابطه مانینگ). نرم افزار HEC-RAS به راحتی امکان

¹ Mixed Flow

جدول ۲- نتایج حاصل از هر یک از نرم افزارها در رابطه با ارتفاع سطح آب در مقایسه با مقادیر اندازه گیری شده (شبیه سازی با پل قوسی و دبی جریان کم)

فاصله (متر)	نتایج ISIS (متر)	نتایج MIKE 11 (متر)	نتایج HEC-RAS (متر)	مقادیر اندازه گیری شده (متر)
۰	./۱۹۱	./۴۶۷	./۲۱۳	-
۱	./۱۸۹	./۴۶۷	./۲۱۳	-
۲	./۱۸۸	./۴۶۷	./۲۱۳	-
۳	./۱۸۶	./۴۶۷	./۲۱۲	-
۴	./۱۸۴	./۴۶۷	./۲۱۲	-
۵	./۱۸۳	./۴۶۷	./۲۱۲	-
۶	./۱۸۲	./۴۶۷	./۲۱۲	./۲۱۹
۶/۵	./۱۸۳	./۴۶۷	./۲۱۲	./۲۱۸
۷	./۱۸۴	./۴۶۷	./۲۱۲	./۲۲
۷/۳۶	./۱۸۴	./۴۶۷	./۱۸۵	-
۷/۴۳	./۱۷۱	./۴۶۷	./۱۸	-
۸	./۱۷۱	./۱۶	./۱۸۳	-
۸/۵	./۱۷	./۱۵۹	./۱۸۱	-
۹	./۱۷	./۱۵۹	./۱۸	-
۱۰	./۱۶۸	./۱۵۹	./۱۷۸	-
۱۱	./۱۶۶	./۱۵۹	./۱۷۷	-
۱۲	./۱۶۴	./۱۵۸	./۱۷۶	-
۱۳	./۱۶۲	./۱۵۸	./۱۷۵	-
۱۴	./۱۶	./۱۵۸	./۱۶۹	-
۱۵	./۱۵۸	./۱۵۸	./۱۶۸	-

جدول ۳- نتایج حاصل از هر یک از نرم افزارها در رابطه با ارتفاع سطح آب در مقایسه با مقادیر اندازه گیری شده (شبیه سازی با پل قوسی و دبی جریان زیاد)

فاصله (متر)	نتایج ISIS (متر)	نتایج MIKE 11 (متر)	نتایج HEC-RAS (متر)	مقادیر اندازه گیری شده (متر)
۰	./۲۱۳	./۶۳۳	./۲۵۳	-
۱	./۲۱۳	./۶۳۳	./۲۵۳	-
۲	./۲۱۳	./۶۳۳	./۲۵۳	-
۳	./۲۱۳	./۶۳۳	./۲۵۳	-
۴	./۲۱۳	./۶۳۳	./۲۵۳	-
۵	./۲۱۳	./۶۳۳	./۲۵۳	-
۶	./۲۱۳	./۶۳۳	./۲۵۳	./۲۶۵
۶/۵	./۲۱۴	./۶۳۳	./۲۵۳	./۲۶۵
۷	./۲۱۴	./۶۳۳	./۲۵۳	./۲۶۸
۷/۳۶	./۲۱۴	./۶۳۳	./۲۱۴	-
۷/۴۳	./۱۸۴	./۶۳۳	./۲۰۶	-
۸	./۱۸۳	./۱۷۳	./۱۹۵	-
۸/۵	./۱۸۳	./۱۷۲	./۱۹۳	-
۹	./۱۸۳	./۱۷۲	./۱۹۳	-
۱۰	./۱۸۱	./۱۷۲	./۱۹۱	-
۱۱	./۱۷۹	./۱۷۲	./۱۸۹	-
۱۲	./۱۷۷	./۱۷۲	./۱۸۸	-
۱۳	./۱۷۵	./۱۷۲	./۱۸۶	-
۱۴	./۱۷۳	./۱۷۲	./۱۸۵	-
۱۵	./۱۷۱	./۱۷۱	./۱۸	-

جدول ۴- ارتفاع سطح آب شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در مدل با پل مستقیم عرشه دار و دبی جریان کم

فاصله (متر)	نتایج ISIS (متر)	نتایج MIKE 11 (متر)	نتایج HEC-RAS (متر)	مقادیر اندازه‌گیری شده (متر)
۰	./۲۳۴	./۱۷۷	./۲۱۴	./۲۱۹
۱	./۲۳۴	./۱۷۷	./۲۱۴	./۲۱۹
۲	./۲۳۴	./۱۷۷	./۲۱۳	./۲۱۸
۳	./۲۳۴	./۱۷۷	./۲۱۳	./۲۱۸
۴	./۲۳۴	./۱۷۶	./۲۱۳	./۲۱۸
۵	./۲۳۴	./۱۷۶	./۲۱۳	./۲۱۷
۶	./۲۳۴	./۱۷۶	./۲۱۳	./۲۱۷
۶/۵	./۲۳۴	./۱۷۶	./۲۱۳	./۲۱۶
۷	./۲۳۴	./۱۷۶	./۲۱۳	./۲۱
۷/۳۶	./۱۷۱	./۱۶	./۱۸	-
۷/۴۳	./۱۷۱	./۱۶	./۱۸۲	-
۸	./۱۷	./۱۶	./۱۸۲	-
۸/۵	./۱۷	./۱۵۹	./۱۸۲	-
۹	./۱۶۸	./۱۵۹	./۱۸۱	./۱۷۳
۱۰	./۱۶۶	./۱۵۹	./۱۸	./۱۷۲
۱۱	./۱۶۴	./۱۵۸	./۱۷۹	./۱۶۷
۱۲	./۱۶۲	./۱۵۸	./۱۷۹	./۱۷
۱۳	./۱۶	./۱۵۸	./۱۶۷	./۱۶۹
۱۴	./۱۵۸	./۱۵۸	./۱۶۵	./۱۶۸

جدول ۵- ارتفاع سطح آب شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در مدل با پل مستقیم عرشه دار و دبی جریان زیاد

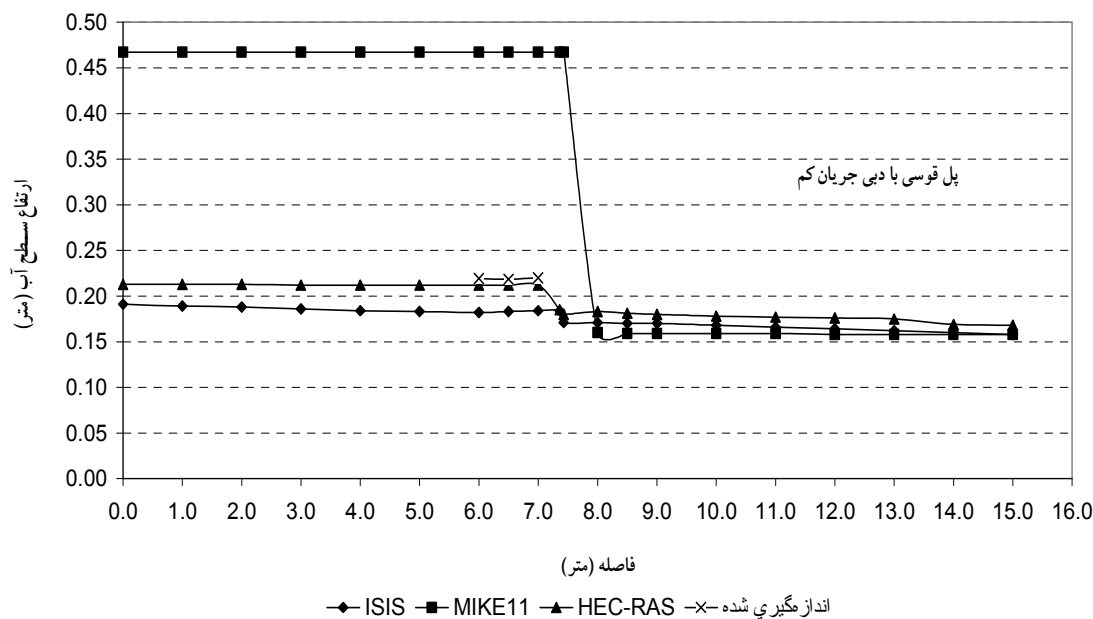
فاصله (متر)	نتایج ISIS (متر)	نتایج MIKE 11 (متر)	نتایج HEC-RAS (متر)	مقادیر اندازه‌گیری شده (متر)
۰	./۳۱۶	./۲۱۳	./۲۵۴	./۲۵۹
۱	./۳۱۶	./۲۱۳	./۲۵۳	./۲۵۹
۲	./۳۱۶	./۲۱۳	./۲۵۳	./۲۶
۳	./۳۱۶	./۲۱۳	./۲۵۳	./۲۶
۴	./۳۱۶	./۲۱۳	./۲۵۳	./۲۵۹
۵	./۳۱۶	./۲۱۳	./۲۵۳	./۲۵۹
۶	./۳۱۶	./۲۱۳	./۲۵۳	./۲۵۹
۶/۵	./۳۱۶	./۲۱۳	./۲۵۳	./۲۵۸
۷	./۳۱۶	./۲۱۳	./۲۵۳	./۲۵۱
۷/۳۶	./۱۸۴	./۱۷۳	./۲۰۵	./۱۶۸
۷/۴۳	./۱۸۳	./۱۷۳	./۱۹۷	-
۸	./۱۸۳	./۱۷۲	./۱۹۷	-
۸/۵	./۱۸۳	./۱۷۲	./۱۹۶	./۱۹۹
۹	./۱۸۱	./۱۷۲	./۱۹۵	./۱۸۱
۱۰	./۱۷۹	./۱۷۲	./۱۹۴	./۱۸۸
۱۱	./۱۷۷	./۱۷۲	./۱۹۳	./۱۸۸
۱۲	./۱۷۵	./۱۷۲	./۱۹۲	./۱۷۸
۱۳	./۱۷۳	./۱۷۱	./۱۹۱	./۱۸۶
۱۴	./۱۷۱	./۱۷۱	./۱۷۹	./۱۷۷

که موجود بوده) نشان می‌دهد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با جریان کم و زیاد در مورد پل مستقیم عرشه‌دار به ترتیب در جدولهای ۴ و ۵ نمایش داده شده است. نیمرخ سطح آب در شکل‌های ۵ تا ۸ نمایش داده شده است. شکل‌های ۵ و ۶ مربوط به نیمرخ سطح آب در بالا دست و پایین دست پل قوسی است و شکل‌های ۷ و ۸، این نیمرخ را به ترتیب در شبیه‌سازیهای با جریان کم و زیاد برای پل مستقیم

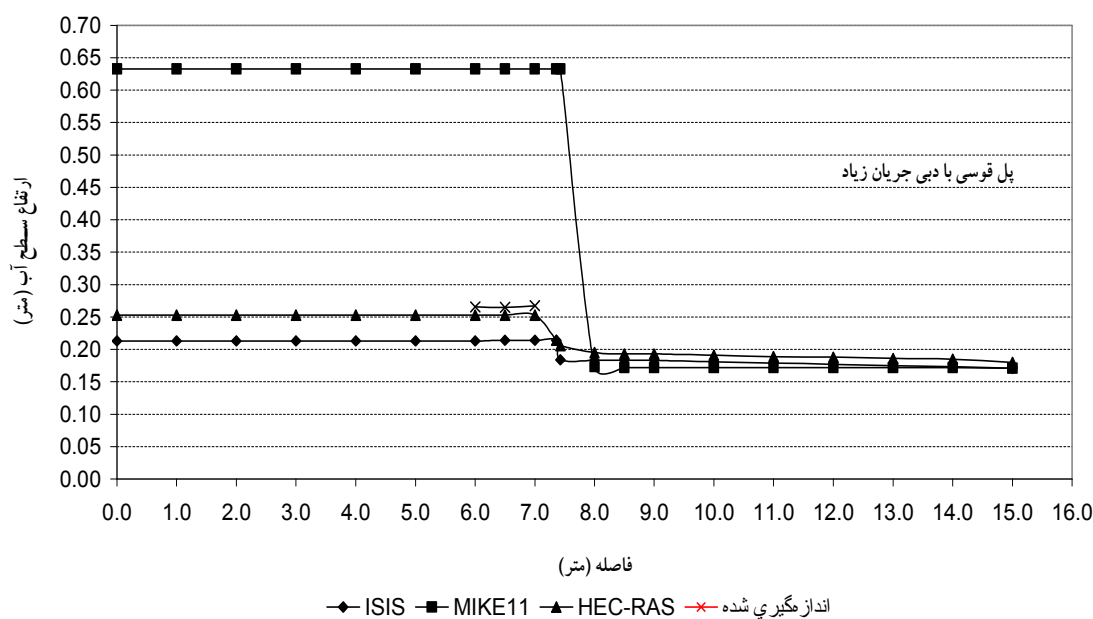
قرار دادن وضعیت پایاب فلوم در حالت عمق نرمال را فراهم می‌سازد، به طوری که رابطه دبی-اشل برای این وضعیت توسط خود نرم افزار محاسبه شده و در مدل وارد می‌گردد.

۳- نتایج و بحث

جدولهای ۲ و ۳ به ترتیب نتایج حاصل از شبیه‌سازی با جریان کم و جریان زیاد در پل قوسی را به همراه نتایج مشاهده‌ای (در مواردی



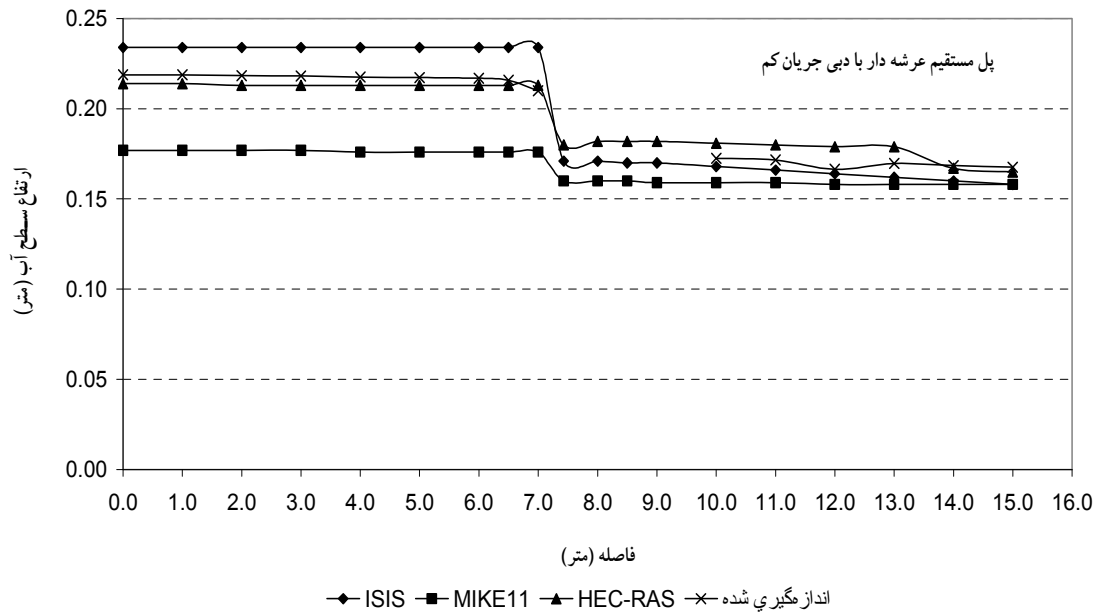
شکل ۵- نیمرخ سطح آب بر اساس نتایج حاصل از هر یک از نرم افزارها و مقادیر اندازه گیری شده در شبیه سازی با پل قوسی و دبی جریان کم



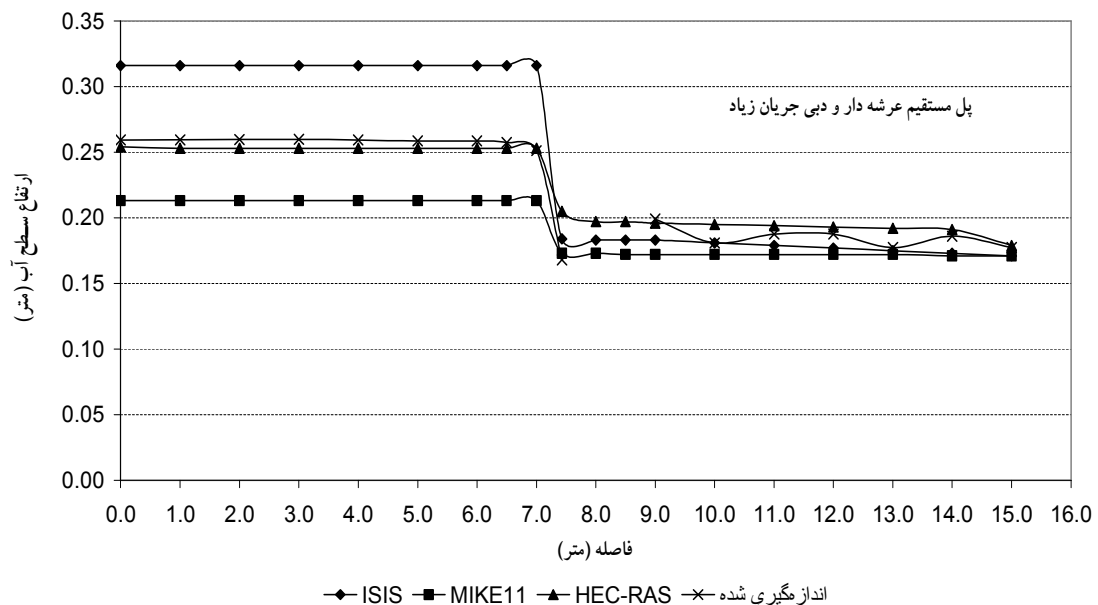
شکل ۶- نیمرخ سطح آب بر اساس نتایج حاصل از هر یک از نرم افزارها و مقادیر اندازه گیری شده در شبیه سازی با پل قوسی و دبی جریان زیاد

جریان در سطح مقطع اول با دبی جریان در سطح مقطع نهایی برای هر شبیه سازی مقایسه شده است. نتیجه این ارزیابی نشان داد که هر سه نرم افزار در این مورد بسیار خوب عمل کرده و دبی ورودی به سیستم با دبی خروجی از سیستم اختلاف چندانی ندارد. به طور کلی می توان گفت که هرچند هر سه نرم افزار قادر به شبیه سازی پل قوسی و پل مستقیم عرشه دار بوده اند، ولی نتایج

عرشه دار نشان می دهد. علاوه بر ارتفاع سطح آب، حجم آبی که در یک زمان مشخص از سیستم می گذرد نیز مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. با توجه به اینکه شبیه سازیها در این تحقیق با استفاده از جریان ماندگار صورت گرفته است، دوره زمانی ویژه جهت ارزیابی حجم آب مفهوم چندانی ندارد و لذا این ارزیابی فقط با مقایسه جریان ورودی و خروجی انجام گرفته است؛ به عبارت دیگر، دبی



شکل ۷- نیمرخ سطح آب بر اساس نتایج حاصل از هر یک از نرم افزارها و مقادیر اندازه‌گیری شده در شبیه‌سازی با پل مستقیم عرشه دار و دبی جریان کم



شکل ۸- نیمرخ سطح آب بر اساس نتایج حاصل از هر یک از نرم افزارها و مقادیر اندازه‌گیری شده در شبیه‌سازی با پل مستقیم عرشه دار و دبی جریان زیاد

نرم افزار دیگر به مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه نزدیک‌تر است. نتایج MIKE11 در این مورد به مقدار قابل ملاحظه‌ای بالاتر از دو نرم افزار دیگر و نیز مقادیر اندازه‌گیری شده است و نتایج ارائه شده به وسیله ISIS اندکی پایین‌تر از مقادیر اندازه‌گیری می‌باشد. در مورد پل مستقیم عرشه دار نیز نتایج ارائه شده به وسیله HEC-RAS کاملاً نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده است. در مورد

اخذ شده از آنها در برخی موارد به طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت بود. بالاترین ارتفاع آب محاسبه شده در بالا دست پل و نیز سرعت مربوطه به عنوان اصلی‌ترین پارامترهایی بوده که در نتایج نرم افزارهای مختلف متفاوت می‌باشد. این مقادیر در جدول ۶ نشان داده شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود در مورد پل قوسی نتایج ارائه شده توسط HEC-RAS در مقایسه با دو

جدول ۶- حد اکثر ارتفاع و سرعت مربوط به آن در بالادست پل در شبیه‌سازیهای انجام شده

نرم افزار	شبیه سازی با پل قوسی		شبیه سازی با پل مستقیم عرشه دار	
	ارتفاع (متر)	سرعت (متر بر ثانیه)	ارتفاع (متر)	سرعت (متر بر ثانیه)
ISIS	دبی کم ۰/۱۹۱	دبی زیاد ۰/۲۱۴	دبی کم ۰/۲۳۴	دبی زیاد ۰/۳۱۶
HEC-RAS	دبی کم ۰/۲۱۳	دبی زیاد ۰/۲۵۳	دبی کم ۰/۲۱۴	دبی زیاد ۰/۲۵۴
MIKE11	دبی کم ۰/۴۶۷	دبی زیاد ۰/۶۳۳	دبی کم ۰/۴۷۰	دبی زیاد ۰/۲۱۳
مقادیر اندازه‌گیری شده	دبی کم ۰/۲۱۹	دبی زیاد ۰/۲۶۷	دبی کم ۰/۲۱۹	دبی زیاد ۰/۲۶۰

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق سه نرم‌افزار شناخته شده هیدرولیکی که عبارت‌اند از ISIS، HEC-RAS و MIKE11 جهت شبیه‌سازی یک بُعدی جریان در زیر پلهای قوسی و مستقیم عرشه‌دار مورد ارزیابی قرار گرفت. در مورد هر پل دو مقدار متفاوت جریان به عنوان شرایط مرزی بالادست به کار رفت. با توجه به نتایج حاصل از تحقیق می‌توان گفت:

۱- هر چند هر سه نرم‌افزار امکانات لازم جهت شبیه‌سازی جریان در زیر هر دو نوع پل را دارند، ولی نتایج متفاوتی را نشان داده‌اند.

۲- با مقایسه نتایج ارائه شده توسط این نرم‌افزارها با مقادیر اندازه‌گیری شده باید گفت که جهت شبیه‌سازی جریان در زیر پل قوسی، HEC-RAS و ISIS (خصوصاً HEC-RAS) توانایی و دقت بیشتری را نشان داده‌اند؛ ولی نتایج MIKE11 فاصله زیادی با نتایج واقعی دارد.

۳- در رابطه با شبیه‌سازی جریان در زیر پل مستقیم عرشه‌دار هر سه نرم‌افزار نتایج معقولی ارائه داده‌اند، هر چند که نتایج حاصل از HEC-RAS در مقایسه با دو نرم‌افزار دیگر به مراتب به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر است.

۴- با توجه به دقت نتایج، راحتی استفاده و نیز توانایی گرافیکی، در این تحقیق مشخص شد که HEC-RAS نرم‌افزار مناسب‌تری جهت شبیه‌سازی جریان در زیر پل می‌باشد.

این نوع پل بر عکس پل قوسی نتایج ارائه شده به وسیله MIKE11 اندکی پایین‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده است، در حالی که نتایج ارائه شده توسط ISIS مقداری بالاتر می‌باشد. از نظر مدت زمانی که جهت ساختن و اجرای مدل در هر یک از سه نرم‌افزار صرف شده است، باید گفت که دو نرم‌افزار ISIS و HEC-RAS در مقایسه با MIKE11 زمان کمتری لازم داشته و شبیه‌سازی را به راحتی انجام دادند در حالی که برای اجرا کردن و تکمیل شبیه‌سازی با MIKE11 زمان و تلاش بیشتری نیاز بود تا شبیه‌سازی پایداری انجام گیرد. کارکردن با این نرم‌افزار به دلیل دریافت پیام خطاهای پیاپی نیاز به دقت و مهارت فراوانی داشت. این در حالی است که میزان تجربه قبلی و مهارت کار با هر سه نرم‌افزار برای نگارنده تقریباً مشابه بوده است. از نظر تواناییهای گرافیکی نیز MIKE11 سطح مقطع پل ایجاد شده را به صورت گرافیکی نمایش نمی‌دهد، در حالی که دو نرم‌افزار دیگر این عمل را انجام می‌دهند و خصوصاً HEC-RAS در این زمینه از توانایی فوق‌العاده‌ای برخوردار می‌باشد. به نظر می‌رسد بخشی از علت اختلاف نتایج نرم‌افزارها به دلیل روشهای محاسباتی متفاوتی است که در آنها به کار گرفته می‌شود که در قسمتهای قبلی مقاله اشاره شد و بخشی نیز به علت سهولت یا دشواری کار با نرم‌افزار در ساخت، واسنجی و اجرای مدل می‌باشد که در این حالت ممکن است خطایی به نتایج نهایی برخی نرم‌افزارها تحمیل شود.

۵- مراجع

- 1- Transport Association of Canada. (2004). *Guide to bridge hydraulics*, 2nd Ed., Thomas Telford Ltd Press.
- 2- Hamill, L. (1999). *Bridge hydraulics: theory and practice*, 1st Ed., E & FN Spon press.
- ۳- زرانی، ر.، مترجم (۱۳۸۱). *نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی پلها*، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

- 4- Kwan, T.L., Yao-Hsien, H., and Yuh-Ju, C. (2006). "Bridge blockage and overbank flow simulation using HEC-RAS in the Keelung river during the 2001 Nari Typhoon." *J. of hydraulic engineering*, 132 (3), 319-323.
- 5- Rodriguez, A., et al. (2000). "Hydraulic analyses for a new bridge over the Parana river Argentina." *International journal of sediment research*, 18 (2), 166-175.
- ۶- انتظاری، ع.ر.، مترجم (۱۳۸۱). *هیدرولیک مهندسی عمران*، چاپ اول، انتشارات نوپردازان.
- ۷- مقصودی، ن.ا.، و کوچک زاده، ص. (۱۳۸۱). *هیدرولیک کانال‌ها*، چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه تهران.
- ۸- ابریشمی، ج.، و حسینی، س.م. (۱۳۷۷). *هیدرولیک کانال‌های باز*، چاپ ششم، انتشارات آستان قدس رضوی.
- 9- Atabay, S., and Knight, D.W. (2002). *Bridge afflux experiments in compound channels*, A report written and presented to the JBA consulting engineers and UK Environmental Agency.
- 10- Wallingford and Halcrow. (2000). *ISIS User Manual*, UK.
- 11- Bradley, N. J. (1978). *Hydraulics of bridge waterways*, US Federal Highway Administration, Bridge Division, USA.
- 12- MIKE 11 User Manual. (2002). DHI, Denmark.
- 13- US Corps of Engineers. (2002). *HEC-RAS User Manual*, USA.
- 14- US Corps of Engineers. (1999). *HEC-RAS Hydraulic Reference*, USA.