



Comparison of Flow Characteristics in a Physical Model with 1D, Quasi-2D, and 2D Numerical Models in a River Reach

M. Yasi¹ and B. Azizpanah²

Abstract

Numerical models are being used widely in river engineering projects. However, the reliability of these models, minimum field data requirement, and the optimal computational processes are of major concern. This study compares the simulated steady flow parameters from a well-known numerical models with that of a true river physical model. A fixed-bed model is developed for the Nazloo River, IRAN, with horizontal scale of 1:100 and vertical scale of 1:20. Results from HEC-RAS (1D), BRI-STARS (quasi 2D), and FAST-2D (2D) were compared for corresponding flow parameters under similar initial and boundary conditions. This was made for five different flows in three sub-reaches along the river (i.e. downstream of a bridge, bridge reach, upstream of the bridge). The best adapted results were produced by HEC-RAS. BRI-STARS and FAST-2D models took the next ranks respectively. The averaged predictive errors were rated 1.8, 2.2, and 5.5 percent for water surface elevations and 10.2, 9, and 12.6 percent for mean velocities, respectively. The application of each model is recommended in river projects subject to the inclusion of the degree of certainties provided by the present study.

Keywords: Physical model, HEC-RAS model, BRI-STARS model, FAST-2D model.

مقایسه خصوصیات جریان در مدل فیزیکی با نتایج مدل‌های ریاضی یک بعدی، شبه دو بعدی و دو بعدی در یک بازه رودخانه

مهدی یاسی^۱ و بهزاد عزیزپناه^۲

چکیده

کاربرد مدل‌های ریاضی در طرح‌های مهندسی رودخانه اجتناب ناپذیر است. با این وجود، نیاز حداقل به اطلاعات صحرائی، حجم محاسباتی اندک و درجه اعتماد مدل‌های ریاضی در رودخانه‌ها باید مورد نظر قرار گیرد. هدف اصلی در تحقیق حاضر، مقایسه نتایج شبیه سازی جریان پایدار از مدل‌های ریاضی شناخته شده با نتایج نظیر از یک مدل فیزیکی رودخانه ای بوده است. برای این منظور، مدل فیزیکی بستر ثابت یک بازه از رودخانه نازلو (با مقیاس افقی ۱:۱۰۰ و قائم ۱:۲۰) طراحی، ساخته و مطالعه گردید. برای شبیه‌سازی جریان، مدل ریاضی یک بعدی HEC-RAS، مدل شبه دو بعدی BRI-STARS، و مدل دو بعدی سطح افق FAST-2D انتخاب گردید. پارامترهای مشترک جریان برای پنج شدت جریان مختلف، در سه زیر بازه رودخانه‌ای (پایین دست پل، پل نازلو، و بالادست پل)، در شرایط اولیه و مرزی مشترک مقایسه گردید. بطور کلی در بازه مورد مطالعه، این سه مدل بترتیب تطابق بهتری را با مدل فیزیکی داشته‌اند. متوسط خطای نسبی برآورد جریان از سه مدل فوق بطور نمونه برای ارتفاع سطح آب بترتیب ۱/۸، ۲/۲ و ۵/۵ درصد؛ و برای سرعت متوسط ۱۰/۲، ۹/۰ و ۱۲/۶ درصد بوده است. در طرح‌های رودخانه‌ای، کاربری هر یک از سه مدل فوق با توجه به محدوده اطمینان ارائه شده در این بررسی توصیه می‌گردد.

کلمات کلیدی: مدل فیزیکی، مدل HEC-RAS، مدل BRI-STARS، مدل FAST-2D.

1- Associate Professor of River Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
2- M.S Graduate, Hydraulic Structures, Urmia University, Urmia, Iran

۱- دانشیار مهندسی رودخانه، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه
۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشگاه ارومیه

خصوصیات جریان در بازه رودخانه در مدل فیزیکی بستر ثابت، تحت شرایط سیل‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله اندازه‌گیری گردید. همچنین با استفاده از مدل ریاضی HEC-2 جریانات مختلف فوق در این بازه شبیه‌سازی و با نتایج حاصل از مدل فیزیکی مقایسه گردید. بر اساس این نتایج، رقوم متوسط سطح آب برای سیل ۵۰ ساله در مدل فیزیکی و در مدل ریاضی عموماً تطابق خوبی داشته است. البته در پایین دست دیواره خاکریز ساحل جنوبی، مدل ریاضی مقادیر ارتفاع سطح آب را بیشتر محاسبه نمود، که دلیل اصلی آن تغییرات شدید در هندسه مقطع عرضی در این بازه ارائه شده است. انجمن مهندسی ارتش آمریکا قابلیت مدل HEC-RAS را در تحلیل جریان‌های مختلط (زیربحرانی- فوق بحرانی) در نزدیکی پل‌ها و سازه‌های تقاطعی با کاربرد آن در یک بازه از رودخانه پوتا در حالت جریان پایدار و با دبی ۱۰۰ ساله آزمون نمود. در تحلیل جریان در محدوده پل از دو روش انرژی^۳ و فشار- سرریز^۴ استفاده شد و پروفیل سطح آب در بالادست و پایین دست پل با هم مقایسه شدند. اختلاف زیادی بین پروفیل‌های سطح آب در دو روش فوق در بالادست پل و داخل دهانه پل مشاهده شد. در نهایت توصیه گردید که حالت واقعی جریان با قضاوت مهندسی و با توجه به شواهد فیزیکی تشخیص داده شود. در بازه‌های مارپیچ رودخانه، مقاطع عرضی باید به هم نزدیک باشند تا پلان بازه در مدل واقعی‌تر معرفی شده، و دقت محاسبات مدل افزایش یابد (USACE, 2002).

مفهوم شبه دو بعدی؛ کاربرد و حل معادلات یک بعدی با استفاده از فرضیه استقرار لوله‌های جریان (به موازات و همسایگی یکدیگر) در گستره عرضی رودخانه است. در اینصورت توزیع عرضی پارامترهای جریان و رسوب را میتوان ارزیابی نمود. مهمترین مدل شبه دو بعدی با کاربرد عمومی در مهندسی رودخانه مدل BRI-STARS است، که برای تحلیل شبه دو بعدی و شبه پایدار جریان آب و انتقال رسوب توسط سازمان فدرال بزرگراه‌های آمریکا (FHWA^۵) در سال ۲۰۰۰ توسعه و تکمیل یافته است. نسخه اول این مدل بنام GSTARS در سال ۱۹۸۶، و نسخه دوم آن با قابلیت شبیه‌سازی مرفولوژیکی رودخانه در سال ۱۹۹۸ ارائه شده بود (FHWA, 2000). در این مدل از معادلات یک بعدی انرژی و مومنتم، و معادلات پیوستگی رسوب یک بعدی، و روابط مختلف بار رسوبی مواد چسبنده و غیر چسبنده استفاده شده است. مدل می‌تواند محاسبات پروفیل سطح آب را در شرایط جریان‌های زیر بحرانی، فوق بحرانی و مختلط بدون گسستگی انجام دهد. از فرضیه استقرار لوله‌های جریان در عرض رودخانه، خصوصیات جریان در چند زیر مقطع عرضی قابل محاسبه است. مدل جریان پایدار و نیز جریان ناپایدار (با روش تحلیل پلکانی هیدروگراف جریان بصورت شبه پایدار) امکان‌پذیر است. BRI-STARS یک مدل مرفولوژیکی ساده با انعطاف پذیری زیاد

بررسی جریان و یا انتقال رسوب در یک بازه رودخانه از طریق ساخت یک مدل مشابه ممکن است. مدل‌های فیزیکی بستر ثابت و تغییر فرم یافته، برای مطالعه خصوصیات جریان و ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی (نظیر: برآورد عمق آب، سرعت، تنش برشی، فشار، و ...) در رودخانه‌های با بستر نسبتاً پایدار مورد استفاده قرار می‌گیرند (ASCE, 2000). اصول و مراحل فرآیند مدل‌سازی رودخانه‌ای بترتیب عبارت است از: (۱) برقراری تشابه فرودی؛ (۲) اطمینان از برقراری جریان متلاطم کاملاً زیر در مدل؛ (۳) انتخاب مقیاس مناسب افقی براساس محدودیت‌های فیزیکی؛ (۴) انتخاب مقیاس مناسب عمودی براساس جریان متلاطم کامل، و دقت کاربرد وسایل اندازه‌گیری؛ (۵) تنظیم زبری و مقاومت جریان براساس اطلاعات شاهد از پروفیل سطح آب در رودخانه؛ (۶) واسنجی مدل بر اساس اطلاعات شاهد؛ (۷) تأیید کارکرد مدل بر اساس اطلاعات دیگر رودخانه‌ای؛ و (۸) کاربرد مدل برای شرایط مورد نظر (یاسی، ۱۳۸۴؛ ASCE, 2000).

شبیه‌سازی خصوصیات جریان رودخانه‌ای، از طریق مدل‌های ریاضی (یک، دو و سه بعدی) امکان‌پذیر است. از مزایای مدل‌های ریاضی می‌توان به سادگی ساخت و ارزیابی، قابلیت کنترل در هندسه مدل، و زمان کارکرد کمتر اشاره نمود. مدل HEC-RAS^۱ مدل جریان یک بعدی است که توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی- انجمن مهندسی ارتش آمریکا (USACE^۲) توسعه یافته، و در طرح‌های مهندسی رودخانه در سطح جهان از اعتبار و اطمینان کافی برخوردار است. این مدل در سال ۱۹۹۳ جایگزین مدل HEC-2 گردید، و در حال حاضر قابلیت شبیه‌سازی جریان پایدار و جریان ناپایدار در شرایط بستر ثابت را دارد. در این مدل، روش حل معادلات در حالت جریان پایدار، روش استاندارد گام به گام و در حالت ناپایدار روش تفاضل‌های محدود ضمنی می‌باشد. مدل می‌تواند در جریان زیر بحرانی، فوق بحرانی و یا ترکیبی، پارامترهای جریان و پروفیل سطح آب را محاسبه می‌کند. این مدل توانایی تحلیل هیدرولیکی پل، کالورت، سرریز، دیواره‌های ساحلی و سازه‌های متقاطع دیگر، همچنین قابلیت محاسبات آبستتگی پایه‌ها و تکیه گاه‌های پل و دیگر سازه‌ها را دارد (USACE, 2002). بخش انتقال رسوب و محاسبات بستر متحرک مدل نیز بزودی فعال خواهد شد. عمومیت کاربرد مدل، درجه اعتماد به نتایج آن، سادگی کاربری مدل، ارزانی و سهولت دسترسی به مدل و راهنمای کاربری آن، از امتیازات این مدل است. تشخیص بستر اصلی رودخانه، و بررسی پارامترهای هیدرولیکی از قبیل سرعت، عمق جریان و تحلیل پروفیل سطح آب در رودخانه سالت (آریزونا- آمریکا) توسط Chen, et al. (1985) مطالعه گردید. در این بررسی،

گرفته شده است. این مدل قابلیت حل معادلات حاکم پیوستگی و مومنت را با روش عددی حجم محدود برای شرایط مرزی نامنظم رودخانه‌ها دارد. این مدل به زبان فرترن ۷۷ نوشته شده، و قابلیت اصلاح و تطبیق با شرایط متنوع جریان را نیز دارد. شبیه‌سازی جریان پایدار و ناپایدار رودخانه راین با استفاده از این مدل دوبردی، و با انطباق شبکه عددی با خطوط منحنی شامل ۶۰ گره در عرض و ۲۴۰ گره در راستای جریان انجام گردید. وضعیت جریان در دو حالت پایدار و ناپایدار با شرایط جریان شاهد شبیه‌سازی شد. برای جریان پایدار با دبی ۲۳۰۰ مترمکعب بر ثانیه، شرایط مرزی بالادست و پایین دست ثابت در نظر گرفته شد. برای جریان ناپایدار، مرز جریان ورودی در بالادست بصورت موج بلند (وضعیت فرضی جزر و مدی) در نظر گرفته شد. مقادیر اندازه‌گیری خصوصیات جریان در مقاطع عرضی رودخانه با نتایج نظیر در مدل ریاضی مورد مقایسه قرار گرفت، که حداکثر خطا برای سرعت جریان معادل ۵/۴ درصد؛ و برای ارتفاع سطح آب این مقدار کمتر از ۰/۱ متر بود. شبیه‌سازی جریان در محدوده تاثیر آبشکن‌ها، و در سیلابدشت رضایت‌بخش گزارش شده است (Wenka, et al., 1991). از سوی دیگر، شبیه‌سازی جریان پایدار و زیر بحرانی با این مدل تطابق خوبی با نتایج نظیر اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی بستر ثابت و در مدل فیزیکی بستر متحرک با حضور آبشکن رودخانه‌ای داشته است (Yasi, 1997).

هنوز درجه اعتماد کاربرد مدل‌های ریاضی پیچیده تر در رودخانه‌های طبیعی در مقایسه با مدل‌های یک بعدی شناخته شده مورد سوال می‌باشد. بطوریکه هنوز نمی‌توان گفت که کاربرد مدل دو بعدی بر یک بعدی، و مدل سه بعدی بر دو بعدی برتری دارد (Wright, 2001). اهداف این بررسی را می‌توان بشرح زیر تفکیک و مشخص نمود: ۱- ارزیابی خصوصیات جریان پایدار در یک بازه رودخانه‌ای (مطالعه موردی: بر روی مدل فیزیکی بازه نازلو- رودخانه نازلو)؛ ۲- مقایسه نتایج خصوصیات جریان پایدار در این مدل فیزیکی با نتایج نظیر شبیه‌سازی شده از سه مدل ریاضی شناخته شده (یک بعدی، شبه دو بعدی، و دو بعدی)؛ و ۳- ارتقاء دانش کاربرد مدل‌های ریاضی با توجه به محدودیت‌ها و درجه اعتماد به نتایج آنها.

۲- روش تحقیق

بازه مورد مطالعه بخشی از رودخانه نازلو (در حوضه دریاچه ارومیه) است که در محدوده پل نازلو (در کیلومتر ۱۳ جاده ترانزیت ارومیه- سرو- ترکیه) به طول ۱۲۰۰ متر (از ۹۰۰ متر بالادست تا ۳۰۰ متر پائین دست پل) قرار دارد. رژیم جریان رودخانه در حال حاضر به

است. با یک لوله جریان، مدل تبدیل به یک مدل یک بعدی می‌شود. هنگامی که از زیر برنامه روندیابی رسوب استفاده نشود، مدل محاسبات هیدرولیکی را برای بستر ثابت انجام می‌دهد. هنگامیکه از زیر برنامه توان حداقل رودخانه استفاده نشود، مدل محاسبات جریان و یا تغییرات کف بستر را برای رودخانه با عرض ثابت انجام می‌دهد (FHWA, 2000). توسعه کاربرد مدل، درجه اعتماد نسبی به نتایج آن، سادگی کاربری مدل، سهولت دسترسی به مدل و راهنمای کاربری آن، و محاسبه توزیع عرضی پارامترهای جریان آب و رسوب رودخانه از امتیازات این مدل است. با این وجود نتایج مطالعات مستقل نشان می‌دهد که این مدل برخلاف مدل HEC-RAS، در حصول به پایداری حل ریاضی نسبت به عواملی نظیر: موقعیت و فاصله مقاطع عرضی (مدل قابلیت میان یابی ندارد)؛ اندازه گام زمانی هیدروگراف (در روش تحلیل شبه پایدار)؛ شدت غیریکنواختی جریان؛ تعداد لوله‌های جریان (در شرایط تحلیل بستر متحرک)؛ شدت بار رسوبی ورودی به بازه؛ و نوع روابط بار رسوبی بسیار حساس است (زندنی، ۱۳۸۳). بر اساس این مطالعات، برای ارزیابی بار رسوبی کمتر از پنج لوله جریان، برای بررسی تغییرات کف بستر حداکثر سه لوله، و برای تغییرات عرضی بستر انتخاب یک لوله جریان مناسب‌تر است. زندنی (۱۳۸۳) شبیه‌سازی خصوصیات جریان پایدار و ناپایدار در شرایط بستر ثابت رودخانه‌ای را با دو مدل شبه دوبردی BRI-STARS و یک بعدی HEC-RAS با شرایط اولیه و مرزی مشترک در دو بازه رودخانه‌ای با مواد درشت دانه (رودخانه قشلاق و رودخانه چهل گزی- در بالادست سد مخزنی قشلاق سندج) مورد آزمون قرار دارد. براساس این نتایج در هر دو مدل، خصوصیات جریان در شرایط پایدار بهتر از جریان ناپایدار تطابق داشته‌اند. همچنین تطابق نتایج دو مدل در بازه‌های یکنواخت‌تر بهتر بوده است. در جریان مختلط و در بازه‌های متاثر از پل و دیگر سازه‌های آبی، کاربرد مدل یک بعدی مطمئن‌تر از مدل شبه دوبردی بوده است (زندنی، ۱۳۸۳). از سوی دیگر، شبیه‌سازی فرآیندهای رسوبگذاری و آبستگي موضعی با این مدل در رودخانه می‌سی‌سی‌پی (در سنت لوئیز- آمریکا) موفقیت‌آمیز گزارش شده است (FHWA, 2000).

مدل‌های دوبردی سطح افق با وجود پیچیدگیهای محاسباتی در حل عددی معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان رودخانه‌ای، قادر به ارزیابی عمق، تنش برشی و متوسط عمقی سرعت در دو بعد کارترین سطح افق هستند. ارزیابی مشخصات دو بعدی جریان بخصوص در شرایط پایدار در طرح‌های رودخانه‌ای از اهمیت بسیاری برخوردار است. مدل دوبردی سطح افق FAST-2D^۲ در موسسه هیدرومکانیک دانشگاه کارلسروهه آلمان توسط گروه کاری پروفیسور Rodi توسعه یافته که مشخصات آن توسط (Zhu 1991) ارائه

سرعت سنج مولینه‌ای (از شرکت آرمفیلد^۸ انگلستان با قطر پروانه ۵ میلیمتر و با دقت $\pm 5\%$) بر روی یک نبشی فلزی با قابلیت حرکت طولی و عرضی و عمقی قرار می‌گرفت. با این سیستم، اندازه‌گیری عمق و سرعت عمقی در هر نقطه از مقطع عرضی و در مقاطع عرضی مختلف امکان‌پذیر بوده است. عمق جریان در هر مقطع عرضی حداقل در پنج نقطه (۲ نقطه در کناره‌های دیواره چپ و راست؛ و ۳ نقطه در میانه جریان - روی خط القعر، در امتداد محور رودخانه، و نقطه دیگر با توجه به توپوگرافی هر مقطع) اندازه‌گیری شده است. در شرایطی که غیریکنواختی کف بستر زیاد بوده، اندازه‌گیری اضافی انجام می‌شد (بعنوان مثال در مقطع S13 به دلیل پستی و بلندی زیاد در کف بستر، اندازه‌گیری در ۱۳ نقطه انجام گردید). در هر امتداد عمقی در طول هر مقطع عرضی، سرعت جریان بطور کلی در چهار موقعیت: معادل $0/2$ ، $0/6$ و $0/8$ عمق از سطح آب، و ۵ میلیمتری از کف بستر (نزدیکترین موقعیت استقرار سرعت‌سنج از کف بستر) با ۳ تکرار اندازه‌گیری انجام گردید. در مواضعی که عمق آب کم بوده، اندازه‌گیری لزوماً در یک موقعیت عمقی (۵ میلیمتری از کف بستر، و یا $0/6$ عمق از سطح آب) انجام می‌گردید.

براساس نتایج اندازه‌گیری پارامترهای جریان در بازه نازلو (عمق جریان، سرعت و دبی جریان)، متوسط پارامترهای جریان در هر مقطع عرضی در مبنای مقیاس مدل و نیز در مقیاس طبیعی رودخانه محاسبه گردیده است. روش محاسبات پارامترهای جریان بترتیب عبارت است از: (۱) ارتفاع سطح آب در هر نقطه (h): از مجموع ارتفاع کف بستر رودخانه و عمق آب محاسبه می‌گردد؛ (۲) ارتفاع متوسط سطح آب (H): از میانگین وزنی ارتفاعات سطح آب در نقاط مختلف مقطع عرضی بدست می‌آید؛ (۳) عمق متوسط (D): از میانگین وزنی عمق‌های اندازه‌گیری شده در امتداد هر مقطع عرضی محاسبه می‌گردد؛ (۴) سرعت متوسط عمقی (U_d): از متوسط سرعت‌های اندازه‌گیری شده در هر امتداد عمقی محاسبه می‌گردد. در مواضعی که عمق آب کم بوده، اندازه‌گیری نقطه‌ای در ۵ میلیمتری از کف بستر یا در $0/6$ عمق از سطح آب معادل سرعت متوسط عمقی منظور می‌گردد؛ (۵) سرعت متوسط (U): از تقسیم دبی بر سطح مقطع جریان در هر مقطع عرضی، و نیز از میانگین وزنی سرعت‌های متوسط عمقی در موقعیت‌های مختلف در امتداد مقطع عرضی بدست می‌آید؛ (۶) عدد فرود (F_r): از محاسبات سرعت متوسط U و عمق متوسط D بدست می‌آید؛ (۷) تنش برشی موضعی بستر (τ): بر اساس اندازه‌گیری سرعت نزدیک بستر و با استفاده از روش Wu and Rajaratnam (2000) محاسبه، و سپس متوسط تنش برشی بستر از میانگین وزنی تنش‌های برشی موضعی در هر مقطع بدست می‌آید.

صورت طبیعی بوده، و حدود 40% جریان آن از سمت ترکیه وارد ایران می‌گردد. در این بررسی از اطلاعات صحرایی مطالعات پیشین (نظیر: نقشه‌برداری ۱۴ مقطع عرضی و مقاطع طولی، برداشت جزئیات هندسی پل نازلو، نمونه‌برداری مواد بستری، نصب سه اشل سطح آب در مقاطع مختلف رودخانه، اندازه‌گیری و ارزیابی رابطه دبی - اشل) استفاده گردید (یاسی، ۱۳۸۴).

مدل فیزیکی: مطالعات تجربی تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک کاربردی گروه آب، دانشگاه ارومیه بر روی مدل فیزیکی بستر ثابت و تغییر فرم یافته رودخانه نازلو - در بازه پل نازلو انجام یافته است. مدل فیزیکی رودخانه نازلو با جزئیات کامل هندسی بستر و پل نازلو، بطول کلی ۱۵ متر، با طول موثر ۱۲ متر، و با مقیاس افقی (۱:۱۰۰) و مقیاس قائم (۱:۲۰) توسط یاسی (۱۳۸۴) طراحی و ساخته شده است. دیواره‌های بیرونی مدل از بلوک سیمانی، و کف بستر مدل از ملات ماسه و سیمان منطبق با توپوگرافی رودخانه ساخته شده است. نمای کلی بازه نازلو و مدل فیزیکی بترتیب در شکل‌های (۱) و (۲)، و مشخصات عمومی مدل رودخانه در جدول (۱) ارائه گردیده است.

پیرو مطالعات ماجدی (۱۳۸۴)، مدل فیزیکی بازه نازلو با توجه به اطلاعات (دبی - اشل) در مقطع کنترل S2 (اشل شماره ۳ در پایین دست پل نازلو)، مقطع کنترل S9 (اشل شماره ۲ در بالادست پل نازلو)، و مقطع کنترل S9 (اشل شماره ۱ در بالادست رودخانه نازلو)، بطور مقدماتی تنظیم و سپس از طریق تغییر در مقاومت جریان (با استفاده از توزیع عناصر زبری نظیر مصالح شن و قلوه سنگ در کف بستر) واسنجی و تأیید گردید (یاسی، ۱۳۸۴). کنترل سطح آب در پایین دست مدل از طریق دریچه کشویی انجام می‌یافت.

شدت جریان ورودی به مدل با استفاده از دستگاه فراصوتی نوع UFM-610P از شرکت کراون^۹ آلمان با دقت $\pm 2\%$ کنترل و اندازه‌گیری مستمر می‌گردید. دقت کارکرد دبی سنج صوتی در محدوده دقت کارکرد سرریزهای واسنجی شده بر روی فلوم‌های موجود در آزمایشگاه قرار داشته است. جریان سنج فوق با رعایت کامل استاندارد، بر روی لوله مستقیم ۱۵ متری ورودی به مخزن آرامش بالادست مدل نصب گردیده بود. برای اندازه‌گیری عمق و سرعت جریان در مدل فیزیکی، از دو سیستم ثابت و متحرک استفاده شده است. سیستم ثابت به عنوان کنترل ارتفاع سطح آب و سرعت جریان در هر آزمون و در طول اندازه‌گیری‌ها، در موقعیت خط القعر مقاطع S2 و S14 قرار داشته‌اند (شکل ۱). در سیستم متحرک، یک عمق‌سنج نوک تیز (نوع مکانیکی با دقت $\pm 0/1$ mm) و یک

بعدی سطح افق نمود. بر اساس نتایج حاصل، اندازه شبکه محاسبات عددی در محدوده بازه نازلو و در مقیاس طبیعی بصورت (۳۴×۱۲۲) مناسب تشخیص داده شد. شبکه درشت‌تر در بعد طولی و عرضی، و نیز شبکه ریزتر در بعد عرضی منجر به ناپایداری حل گردیده، و از قابلیت شبیه‌سازی ارتفاع سطح آب بازه نازلو می‌کاست. بنابراین، در این بررسی نیز شبکه عددی (۳۴×۱۲۲) با استفاده از نرم‌افزار ANSYS و مطابق با شکل (۳) بر گستره مرزی مدل فیزیکی بازه نازلو تطبیق داده شد. مختصات سه بعدی گره‌های ایجاد شده در این شبکه (x, y, z) به عنوان فایل ورودی مدل دوبعدی سطح افق آماده و معرفی گردید.

بر اساس اطلاعات ورودی مشترک هندسی و فیزیکی، و شرایط اولیه و مرزی یکسان با مدل فیزیکی، سه مدل ریاضی فوق برای ۵ شرایط مختلف جریان در جدول (۲)، در بازه نازلو اجرا شدند. مقایسه نتایج مدل فیزیکی با سه مدل ریاضی بر اساس پارامترهای مشترک جریان یک بعدی (ارتفاع سطح آب، عمق متوسط، سرعت متوسط، عدد فرود، متوسط تنش برشی بستر) در شدت جریان‌های مختلف صورت پذیرفته است. برای این منظور، اطلاعات اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی و نیز نتایج شبیه‌سازی جریان در مدل‌های ریاضی، با استفاده از روش متوسط وزنی در عمق و عرض به اطلاعات و نتایج یک بعدی (در راستای عمومی جریان در بازه، و در موقعیت مقاطع عرضی S1 تا S14) تبدیل و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

خطای اندازه‌گیری و تحلیل خصوصیات جریان در مدل فیزیکی برای ارتفاع متوسط سطح آب و سرعت متوسط در هر مقطع عرضی بترتیب حداکثر معادل ۴/۳ و ۶/۱ درصد برآورد گردیده است (یاسی ۱۳۸۴).

در این تحقیق، آزمون مدل فیزیکی در ۵ شرایط مختلف جریان مطابق جدول (۲) انجام یافته است. نتایج بررسی جریان در مدل فیزیکی نشان داد که، حداکثر ظرفیت انتقال جریان در بازه پایین دست پل ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه، و در بازه بالادست پل ۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه است (یاسی ۱۳۸۴). از اینرو همانگونه که در جدول (۲) دیده می‌شود، آزمون دبی‌های ۲۱۰ و ۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه برای بازه پایین دست پل انجام نشده است.

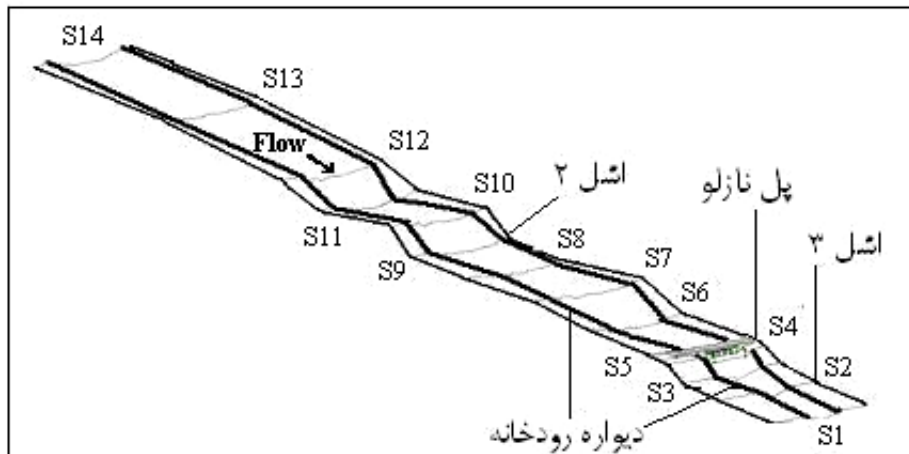
مدل‌های ریاضی: مدل ریاضی یک بعدی HEC-RAS و مدل شبه دوبعدی BRI-STARS برای شرایط هندسی، مرزی و هیدرولیکی مشترک با شرایط جریان پایدار در مدل فیزیکی بازه نازلو تطبیق و اجرا گردید. در مدل جریان دو بعدی سطح افق FAST-2D، معادلات حاکم از روش عددی حجم محدود حل گردیده و نیازمند شبکه محاسبات عددی است. در مطالعات پیشین بازه نازلو جهت شبیه‌سازی جریان با مدل دو بعدی فوق، ماجدی (۱۳۸۴) از میان یابی مختصات توپوگرافی سه بعدی (x, y, z) نقشه‌برداری شده رودخانه نازلو اقدام به ساخت شبکه محاسباتی دو

جدول ۱- مشخصات مدل فیزیکی بازه نازلو- رودخانه نازلو

نوع مدل فیزیکی	بستر ثابت و تغییر فرم یافته
طول مدل فیزیکی رودخانه	۱۲ m
عرض مدل فیزیکی رودخانه	۱/۸ m
مقیاس افقی	۱:۱۰۰
مقیاس قائم	۱:۲۰
تعداد کل مقاطع عرضی	۱۴
محل پل نازلو	بین مقاطع S4 و S5
تعداد مقاطع عرضی پایین دست پل	۴
تعداد مقاطع عرضی بالادست پل	۱۰
طول عرشه پل نازلو- در رودخانه	۵۶ m
عرض عرشه پل- در رودخانه	۸/۶ m
تعداد پایه‌های پل (عرض پایه پل- در رودخانه)	۴ (۲/۰ m)
تعداد دهنه‌های پل (عرض دهنه پل- در رودخانه)	۵ (۹/۶ m)
زاویه پایه پل‌ها نسبت به عرشه پل	۱۵°
جنس کف بستر	ملات شن و ماسه و سیمان
ابعاد مخزن آرامش بالادست	۳/۰ × ۱/۸ × ۱/۲ m
کنترل پایین دست: دریچه کشویی	۰/۸۵ × ۰/۵ m

جدول ۲- طرح آزمون‌های مختلف در مدل‌سازی بازه نازلو- رودخانه نازلو

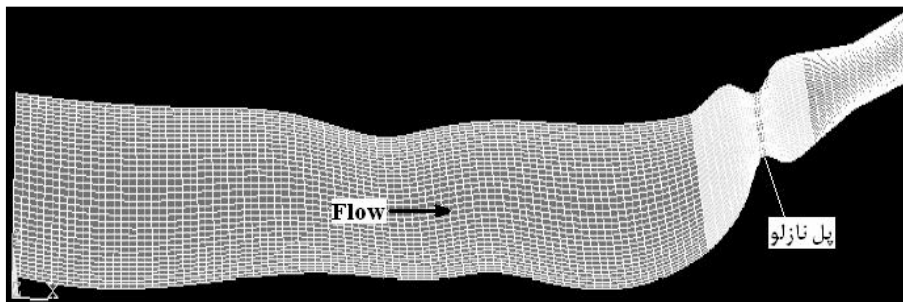
آزمون	دبی (m ³ /s)		مقاطع مورد استفاده	ملاحظات
	در رودخانه	در مدل فیزیکی		
۱	۸۵	۳-۱۰×۹/۵۳	S _J , J = 1 to 14	معادل سیل دو ساله
۲	۱۱۰	۳-۱۰×۱۲/۴۴	S _J , J = 1 to 14	میانگین سیل متوسط دوره آماری ۴۳ ساله (۱۳۲۸-۱۳۷۷)
۳	۱۵۰	۳-۱۰×۱۶/۹۲	S _J , J = 1 to 14	حداکثر ظرفیت انتقال بازه پایین دست پل نازلو
۴	۲۱۰	۳-۱۰×۲۳/۶۳	S _J , J = 6 to 14	در ظرفیت بازه بالادست پل
۵	۲۵۰	۳-۱۰×۲۸/۱۰	S _J , J = 6 to 14	حداکثر ظرفیت انتقال بازه بالادست پل



شکل ۱- نمای بازه نازلو، رودخانه نازلو



شکل ۲- نمای عمومی مدل فیزیکی بازه نازلو- رودخانه نازلو



شکل ۳- پلان بازه نازلو و شبکه محاسبات عددی (۱۲۲×۳۴) با استفاده از نرم افزار ANSYS

۳- نتایج و بحث

به منظور مقایسه نتایج و تحلیل خصوصیات جریان، و با توجه به شکل (۱)؛ بازه مورد مطالعه براساس خصوصیات هندسی و هیدرولیکی (نظیر: شکل و راستای عمومی جریان، شدت تغییرات در پارامترهای جریان، رژیم جریان، و موقعیت تاثیر پل نازلو)، و نیز بر اساس مطالعه تجربی جریان در مدل فیزیکی به سه زیر بازه بشرح زیر تقسیم شده است.

زیر بازه پایین دست پل: این بازه نسبتاً مستقیم بوده، و شکل مقاطع عرضی تقریباً منظم و یکنواخت است. این بازه شامل مقاطع S1، S2 و S3 بوده، و رژیم جریان در آن زیربحرانی است. مقطع S2 (محل نصب اشل شماره ۳ در شکل ۱) بعنوان مقطع کنترل در این زیر بازه است.

پل نازلو: پل نازلو در حدفاصل مقاطع S4 (مقطع درست پایین دست پل) و S5 (مقطع درست بالادست پل) قرار دارد. در شرایط جریانات مختلف، در مقطع S4 جریان فوق بحرانی و در مقطع S5 جریان زیربحرانی می‌باشد. کاهش ارتفاع کف و وجود آبشار حدود ۲ متری در پایین دست مقطع S4، سبب ایجاد جریان فوق بحرانی در پائین دست پل است. در پائین دست و حدفاصل مقطع S4 و S3 تغییر سریع جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی (جهش) پیش آمده، که توأم با تلاطم شدید و افت انرژی زیاد می‌باشد.

زیر بازه بالادست پل: این بازه در بالادست پل و حدفاصل مقاطع S6 تا S14 قرار دارد. رژیم جریان در این بازه زیر بحرانی است. در محدوده S6 تا S7 نسبتاً راستای منحنی داشته، و در دبی‌های بالاتر (۲۱۰ و ۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه) پدیده برگشت آب در آن قابل ملاحظه است. در حدفاصل مقاطع عرضی S8 تا S14 راستای نسبتاً مستقیم داشته، و شدت تغییرات پارامترهای جریان در

آن کم است. مقطع S9 (محل نصب اشل شماره ۲ در شکل ۱) بعنوان مقطع کنترل در بالادست پل بوده است.

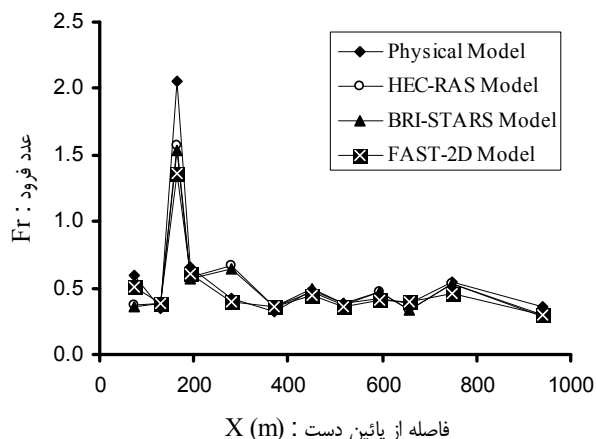
نتایج اندازه گیری توزیع عمق و ارتفاع سطح آب، و نیز توزیع عمقی سرعت جریان در گستره عرضی و طولی مدل فیزیکی رودخانه نازلو با نتایج نظیر شبیه‌سازی از سه مدل ریاضی بصورت یک بعدی (شامل: ۱- ارتفاع سطح آب، ۲- عمق متوسط، ۳- سرعت متوسط جریان، ۴- عدد فرود، ۵- متوسط تنش برشی جریان) مقایسه و تحلیل گردیده است. جدول (۳) نتایج برآورد پارامترهای متوسط جریان را از مدل فیزیکی و نیز سه مدل ریاضی را بطور نمونه برای آزمون شماره ۱ و ۳ بترتیب با دبی ۸۵ و ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه در مقاطع عرضی معرف بازه نازلو (مقاطع S2، S4، S7، S11 در شکل ۱) ارائه می‌نماید. روند تغییرات برخی از پارامتر متوسط جریان در طول بازه رودخانه، بطور نمونه برای آزمون شماره ۳ در شکل‌های (۴) تا (۶) نشان داده شده است. جدول (۴)، خطای برآورد هر یک از پنج پارامتر متوسط جریان را از مدل‌های شبیه ساز در مقایسه با مدل فیزیکی برای پنج آزمون جریان- در طول بازه نازلو ارائه می‌نماید.

متوسط درصد خطای نسبی برآورد پارامترهای مشترک جریان از سه مدل ریاضی در هر یک از سه زیر بازه رودخانه، بطور خلاصه در جدول (۵) ارائه گردیده است. خلاصه نتایج این بررسی بترتیب زیر تشریح و مورد بحث قرار می‌گیرد. برای جلوگیری از تعدد تکرار نام انگلیسی سه مدل ریاضی HEC-RAS، BRI-STARS و FAST- 2D در متن فارسی؛ از این پس تا حد امکان بترتیب از عناوین مدل یک بعدی، مدل شبه دو بعدی، و مدل دو بعدی استفاده خواهد شد.

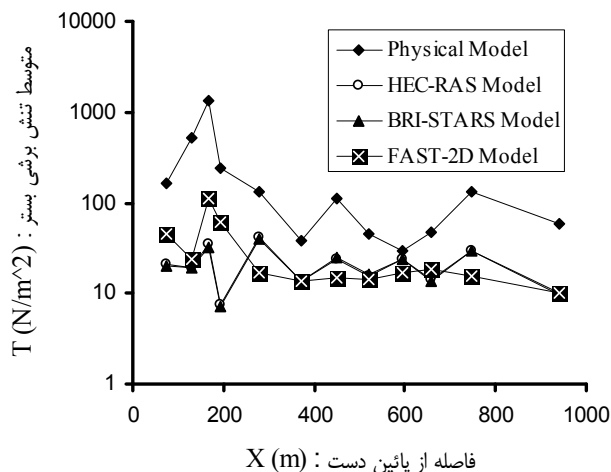
۳-۱- ظرفیت جریان

ظرفیت انتقال جریان از مجرای اصلی بازه رودخانه نازلو در مدل فیزیکی و نیز از طریق مدل‌های ریاضی مورد آزمون قرار گرفت. در پایین دست پل نازلو، ظرفیت جریان در مدل فیزیکی معادل ۱۵۰

(Q=150 CMS)



شکل ۶- مقایسه تغییرات عدد فرود در آزمون سوم (Q=150 CMS)

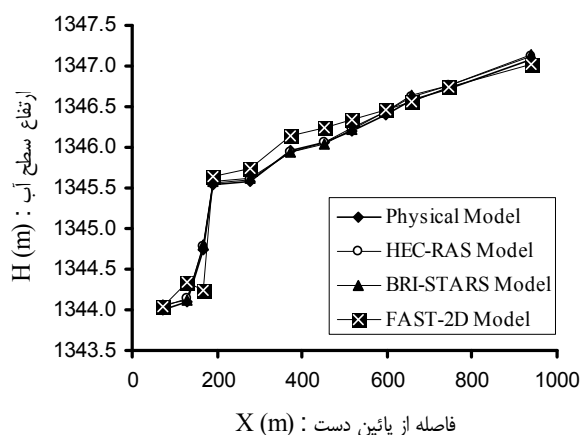


شکل ۷- مقایسه تغییرات متوسط تنش برشی بستر در آزمون سوم (Q=150 CMS)

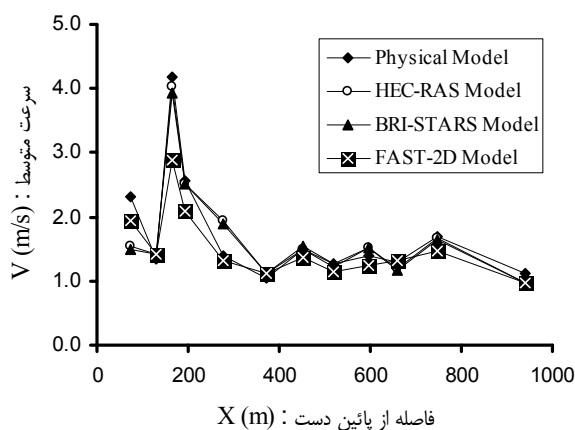
۳-۲- ارتفاع سطح آب

نتایج جداول (۴) و (۵) و شکل نمونه (۴) نشان می‌دهد که از میان پارامترهای جریان، بهترین تطابق میان مدل فیزیکی با مدل‌های ریاضی در ارتفاع سطح آب بوده، و روند تغییرات پروفیل سطح آب از بالادست تا پائین دست پل نازلو بخوبی مدل شده است. مدل بعدی، مدل شبه دو بعدی و مدل دو بعدی، بترتیب تطابق بهتری داشته، و متوسط خطای برآورد آنها در خارج از هندسه پل به ترتیب معادل $1/8\% \pm$ ، $2\% -$ و $5/5\% \pm$ است. براساس این نتایج، ارتفاع سطح آب در طول بازه نازلو (در هر سه ناحیه کاملاً متفاوت جریان از بالادست تا پائین دست پل) توسط مدل شبه دو بعدی کمتر برآورد می‌گردد، که دلیل آن برای مولفین نامعلوم می‌باشد.

مترمکعب بر ثانیه بوده که با تحلیل هیدرولیکی دو مدل ریاضی یک بعدی و شبه دو بعدی مطابقت داشته، ولی برآورد مدل دو بعدی کمتر (معادل ۱۴۰ متر مکعب بر ثانیه) بوده است. ظرفیت جریان در بالادست پل، با مدل فیزیکی و دو مدل ریاضی یک بعدی و شبه دو بعدی تقریباً یکسان و معادل ۲۵۰ متر مکعب بر ثانیه، و با مدل دو بعدی برابر ۲۴۰ متر مکعب بر ثانیه بدست آمده است. براساس مطالعات بر روی مدل فیزیکی، در صورتی که محدودیت ارتفاعی دیواره‌های موجود رودخانه در بالادست پل مرتفع گردد، ظرفیت انتقال پل نازلو تا حدود ۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه برآورد می‌گردد. در برآورد ظرفیت جریان عبوری از بازه نازلو؛ به ترتیب مدل یک بعدی، مدل شبه دو بعدی، و مدل دو بعدی تطابق بهتری داشته‌اند. از آنجا که مبنای فیزیکی معادلات یک بعدی پیوستگی، انرژی و مومنتم مستحکم‌تر و حل این معادلات نیز صریح‌تر و دقیق‌تر از معادلات دو بعدی جریان است، می‌توان دقت و اعتماد بیشتر مدل‌های یک بعدی (به خصوص مدل HEC-RAS) را در ارزیابی خصوصیات عمومی جریان و بالاخص دبی جریان انتظار داشت.



شکل ۸- پروفیل سطح آب در آزمون سوم (Q=150 CMS)



شکل ۹- مقایسه سرعت متوسط در آزمون سوم

جدول ۳- ارزیابی پارامترهای متوسط جریان در مقاطع معرف بازه نازو از مدل فیزیکی و مدل های ریاضی - آزمون های اول و سوم

مقطع معرف	نوی Q (m ³ /s)	ارتفاع متوسط سطح آب H (m)			سرعت متوسط V (m/s)			عمق هیدرولیکی D (m)			عدد فرود Fr			متوسط تنش برشی بستر τ_0 (N/m ²)				
		۱*	۲*	۳*	۱*	۲*	۳*	۱*	۲*	۳*	۱*	۲*	۳*	۱*	۲*	۳*		
S2	۸۵	۱۳۵۷/۵۰	۱۳۳۷/۵۵	۱۳۳۶/۵۷	۱/۵۸	۱/۲۳	۱/۲۴	۱/۳۶	۱/۳۶	۱/۱۶	۱/۳۴	۱/۳۴	۱/۳۴	۱/۵۱	۱/۴۹	۱/۴۴	۳/۱۰	
		۱۳۳۶/۰۰	۱۳۳۶/۰۴	۱۳۳۶/۰۷	۲/۳۲	۱/۵۳	۱/۴۹	۱/۵۴	۱/۵۳	۱/۵۱	۱/۴۴	۱/۴۶	۱/۴۶	۱/۵۰	۲/۱۱	۱/۴۸	۱/۴۸	۳/۳۳
S4	۸۵	۱۳۳۶/۵۴	۱۳۳۶/۵۶	۱۳۳۶/۶۲	۲/۳۴	۲/۲۳	۲/۲۳	۲/۲۶	۲/۲۶	۲/۲۸	۲/۲۶	۲/۲۶	۲/۲۶	۲/۲۶	۲/۲۶	۲/۲۶	۲/۲۶	۳/۱۵
		۱۳۳۶/۴۴	۱۳۳۶/۴۹	۱۳۳۶/۵۱	۲/۱۸	۲/۰۲	۲/۹۴	۲/۵۶	۲/۵۶	۲/۵۸	۲/۵۶	۲/۵۶	۲/۵۶	۲/۵۶	۲/۵۶	۲/۵۶	۲/۵۶	۲/۵۶
S7	۸۵	۱۳۳۶/۵۸	۱۳۳۶/۶۱	۱۳۳۶/۶۰	۲/۹۲	۲/۹۰	۲/۹۱	۲/۸۸	۲/۸۴	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۳/۱۴
		۱۳۳۶/۹۵	۱۳۳۶/۹۴	۱۳۳۶/۹۴	۱/۰۴	۱/۱۲	۱/۱۳	۱/۰۹	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲
S11	۸۵	۱۳۳۶/۳۳	۱۳۳۶/۳۹	۱۳۳۶/۳۱	۱/۵۸	۲/۹۱	۲/۸۹	۲/۸۱	۲/۹۷	۲/۹۹	۲/۹۹	۲/۹۹	۲/۹۹	۲/۹۹	۲/۹۹	۲/۹۹	۲/۹۹	۳/۱۵
		۱۳۳۶/۵۹	۱۳۳۶/۶۲	۱۳۳۶/۶۲	۱/۳۰	۱/۱۹	۱/۱۸	۱/۲۳	۱/۲۴	۱/۲۴	۱/۲۴	۱/۲۴	۱/۲۴	۱/۲۴	۱/۲۴	۱/۲۴	۱/۲۴	۱/۲۴

* ۱- مدل فیزیکی، ۲- مدل HEC-RAS، ۳- مدل BRI-STARS، ۴- مدل FAST-2D

جدول ۴- ارزیابی درصد خطای نسبی برآورد پارامترهای جریان از مدل های ریاضی در مقایسه با مدل فیزیکی

پارامتر	مدل ریاضی (m ³ /s)	HEC-RAS			BRI-STARS			FAST-2D			
		۱*	۲*	۳*	۱*	۲*	۳*	۱*	۲*	۳*	
ارتفاع	دبی (m ³ /s)	۸۵	۱۱۰	۲۵۰	۸۵	۲۱۰	۲۵۰	۸۵	۱۱۰	۲۱۰	۲۵۰
		۲	-۲	-	-۳	-۲	-	-۱۱	-۱۰	-۵	-
سطح	بازه پایین دست پل	۲	-۷	-۲	-۱۳	-۸	-۳	۲۷	۹	(-۶,۵۵)	-۱۲
		۹	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۳,۶)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۴,۴)	(-۱,۳)	(-۱,۳)	(-۶,۴)
آب	بازه بالادست پل	(-۱,۲)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۱,۳)	(-۱,۳)	(-۶,۴)
		(-۹,۴)	(-۹,۴)	(-۹,۴)	(-۹,۴)	(-۹,۴)	(-۹,۴)	(-۹,۴)	(-۹,۴)	(-۹,۴)	(-۹,۴)
عمق	بازه پایین دست پل	(-۱,۲)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۱,۳)	(-۱,۳)	(-۶,۴)
		(-۱,۲)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)
متوسط	بازه بالادست پل	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۱,۳)	(-۱,۳)	(-۶,۴)
		(-۱,۲)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)
سرعت	بازه پایین دست پل	(-۱,۲)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۱,۳)	(-۱,۳)	(-۶,۴)
		(-۱,۲)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)
متوسط	پل	۱۰	۸	۳	۱۳	۴	۵	(-۴,۳۵)	(-۲,۳۷)	(-۲,۳۷)	۱۳
		(-۲,۱)	(-۱۱,۴)	(-۱۳,۶)	(-۱۰,۴)	(-۹,۷)	(-۳,۱۴)	(-۹,۸)	(-۹,۸)	(-۹,۸)	(-۹,۸)
عدد	بازه بالادست پل	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۱,۳)	(-۱,۳)	(-۶,۴)
		(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)
فرود	بازه پایین دست پل	۱۶	۱۵	۲	۱۹	۲	۲	۱	(-۱۲,۶)	(-۱۲,۶)	۹
		(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)
تنش	بازه بالادست پل	۸۲	۷۷	۸۷	۸۲	۷۷	۸۸	۵۶	۵۵	۷۷	(-۱۱,۱۴)
		(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)
برشی	پل	۹۶	۹۷	۹۷	۹۷	۹۷	۹۷	۲۰	۵۰	۶۸	(-۶,۴)
		(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)	(-۲,۱)

جدول ۵- ارزیابی متوسط درصد خطای نسبی برآورد پارامترهای مشترک جریان از مدل‌های ریاضی

پارامتر	مدل ریاضی	HEC-RAS	BRI-STARS	FAST-2D
ارتفاع سطح آب	بازه پایین دست پل	-۱/۹	-۲/۵	±۶/۴
	محدوده پل	-۵/۰	-۸/۱	±۲۳/۷
	بازه بالادست پل	±۱/۷	-۲/۰	±۴/۵
عمق متوسط آب	بازه پایین دست پل	±۵/۳	±۹/۳	±۹/۰
	محدوده پل	±۶/۲	±۶/۳	±۱۹/۹
	بازه بالادست پل	±۵/۱	±۵/۳	±۷/۳
سرعت متوسط آب	بازه پایین دست پل	+۱۲/۳	±۱۱/۴	±۱۴/۴
	محدوده پل	±۷/۴	+۸/۳	±۱۷/۹
	بازه بالادست پل	+۸/۲	±۶/۵	±۱۰/۹
عدد فرود	بازه پایین دست پل	±۱۲/۷	±۱۲/۷	±۱۵/۳
	محدوده پل	+۱۲/۴	+۱۳/۸	+۲۰/۰
	بازه بالادست پل	±۱۱/۰	±۷/۹	±۱۲/۲
تنش برشی بستر	بازه پایین دست پل	+۸۱/۹	+۸۲/۳	+۶۲/۹
	محدوده پل	+۹۶/۸	+۹۷/۰	+۷۷/۴
	بازه بالادست پل	+۷۰/۸	+۶۹/۳	+۷۴/۷

۳-۴- سرعت متوسط جریان

نتایج خطای برآورد در جداول (۴) و (۵) نشان می‌دهد که، مدل شبه دو بعدی، مدل یک بعدی و مدل دو بعدی، بترتیب تطابق بهتری با داده‌های فیزیکی داشته‌اند. متوسط خطای برآورد این سه مدل در خارج از هندسه پل، بترتیب معادل ۹٪، ±۱۰/۲ و ±۱۲/۶ است. شکل (۵) بطور نمونه نشان می‌دهد که، روند تغییرات سرعت متوسط از بالادست تا پائین دست پل نازلو مشابه یکدیگر مدل شده است. برآورد مدل دو بعدی FAST-2D در ناحیه برگشت آب (در بالادست پل) بهتر و واقعی‌تر از دو مدل ریاضی دیگر است، ولی در نزدیکی پل اختلاف برآورد بیشتری نسبت به دو مدل دیگر نشان می‌دهد.

۳-۵- عدد فرود

عدد فرود (Fr) تاثیر توام عمق و سرعت متوسط جریان را در بر داشته، و بعد از ارتفاع سطح آب مهمترین شاخص در ارزیابی شبیه‌سازی جریان می‌تواند بشمار آید. از نتایج جداول (۴) و (۵)، مدل شبه دو بعدی، مدل یک بعدی و مدل دو بعدی، به‌ترتیب تطابق بهتری داشته، و متوسط خطای برآورد آنها در خارج از هندسه پل به ترتیب معادل ۱۰٪، ±۱۲٪ و ±۱۳/۵ است. شکل (۶) بطور نمونه نشان می‌دهد که، روند تغییرات عدد فرود از بالادست تا پائین دست پل نازلو مشابه یکدیگر مدل شده است. برآورد مدل دو بعدی در ناحیه برگشت آب (در بالادست پل) بهتر و واقعی‌تر از دو مدل ریاضی دیگر است، ولی در نزدیکی پل اختلاف بیشتری دارد. نتایج حاصل بطور کلی نشان می‌دهد که، در دبی‌های کمتر (۸۵ و ۱۱۰

شبیه‌سازی پدیده برگشت آب در بالادست پل با مدل دو بعدی نمایان‌تر و درعین حال نزدیک‌تر به نتایج اندازه‌گیری در مدل فیزیکی است. دو مدل یک بعدی و شبه دو بعدی پدیده برگشت آب را تنها در دبی‌های بالاتر (۲۱۰ و ۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه) نشان دادند، در حالی که مدل دو بعدی اثر برگشت آب را در هر پنج آزمون نشان داد. بنظر می‌رسد که معرفی هندسه پل و پایداری حل معادلات در شبکه ریز محاسباتی باعث شبیه‌سازی جزئی‌تر میدان جریان در نزدیکی پل و انتشار تاثیر برگشت آب به فواصل بالادست می‌گردد. در موقعیت پل، مدل دو بعدی خطای بیشتری نسبت به مدل‌های یک بعدی دارد. برای شرایط پیچیده جریان متلاطم در محدوده دهانه پل؛ هنوز نمی‌توان انتظار برآورد دقیق‌تر از معادلات دو بعدی موجود داشت، همان طوری که نباید امتیازی برای معادلات ساده‌تر یک بعدی نیز در این فضا قائل شد.

۳-۳- عمق متوسط آب

براساس نتایج جداول (۴) و (۵)، برآورد عمق متوسط از سه مدل یک بعدی، شبه دو بعدی و دو بعدی، بترتیب تطابق بهتری داشته با نتایج اندازه‌گیری‌ها دارد، متوسط خطای برآورد عمق در خارج از هندسه پل به‌ترتیب معادل ۵/۲٪، ±۷/۸٪ و ±۸/۱٪ است. در موقعیت پل، مدل دو بعدی خطای بیشتری نسبت به مدل‌های یک بعدی دارد. همچنین، شدت تفاوت خطای برآورد بین دو ناحیه کاملاً متفاوت بالادست و پائین دست پل نازلو نشان می‌دهد که، نتایج از مدل یک بعدی و مدل دو بعدی، به‌ترتیب پایدار تر از مدل شبه دو بعدی است.

۴- نتیجه گیری

در این بررسی، خصوصیات جریان در مدل فیزیکی بستر ثابت بازه نازلو- رودخانه نازلو در پنج آزمون مختلف جریان (جدول ۲) با نتایج نظیر از سه مدل شبیه‌ساز یک بعدی HEC-RAS، شبه دوبعدی BRI-STARS و دو بعدی FAST-2D تحت شرایط اولیه و مرزی مشترک مورد ارزیابی قرار گرفته است. بازه مورد مطالعه شامل سه ناحیه معرف از خصوصیات جریان رودخانه‌ای (۱- ناحیه بالادست پل با پدیده برگشت آب؛ ۲- ناحیه پل با جریان مختلط؛ ۳- ناحیه پائین دست پل) است. نتایج حاصل از سنجش ظرفیت انتقال جریان در شرایط موجود رودخانه نازلو نشان می‌دهد که، هر سه مدل قابلیت شبیه سازی خوبی داشته، ولی مدل دوبعدی دبی مقطع پر را در حدود ۶٪ کمتر برآورد می‌کند.

خلاصه نتایج سنجش پنج پارامتر مشترک جریان (شامل: ۱- ارتفاع سطح آب، ۲- عمق متوسط آب، ۳- سرعت متوسط آب، ۴- عدد فرود، ۵- متوسط تنش برشی) برای سه ناحیه (پایین دست پل، پل نازلو و بالادست پل) از سه مدل ریاضی در جدول (۵) ارائه گردیده است. بطور کلی نتایج شبیه‌سازی مدل یک بعدی، مدل شبه دوبعدی و مدل دوبعدی، بترتیب تطابق بهتری با داده‌های تجربی در مدل فیزیکی بازه نازلو دارد. از میان پارامترهای جریان، بهترین تطابق میان مدل فیزیکی با مدل‌های ریاضی در ارتفاع سطح آب و روند تغییرات آن از بالادست تا پائین دست پل بوده است. متوسط خطای برآورد ارتفاع سطح آب در خارج از هندسه پل از مدل یک بعدی معادل ۱/۸٪، از مدل شبه دو بعدی برابر ۲/۲٪، و از مدل دو بعدی حدود ۵/۵٪ است. خطای برآورد سرعت متوسط در خارج از هندسه پل از مدل شبه دو بعدی، مدل یک بعدی و مدل دو بعدی، بترتیب ۹٪، ۱۰/۲٪ و ۱۲/۶٪ است. روند جریان مختلط در ناحیه تاثیر پل نازلو در رودخانه نازلو بخوبی با هر سه مدل ریاضی شبیه‌سازی شده است. ارزیابی عدد فرود با سه مدل نزدیک بهم بوده، متوسط خطای برآورد آنها در محدوده ۱۰٪ تا ۱۳/۵٪ است. در دبی‌های بالاتر، برآورد عدد فرود از مدل یک بعدی مطابقت بیشتری با مدل فیزیکی دارد. روند تغییرات متوسط تنش برشی بستر جریان در طول بازه مشابه بوده؛ مقادیر آنها در مدل‌های ریاضی تطابق بیشتری با هم دارند، ولی با نتایج نظیر در مدل فیزیکی اختلاف زیاد (در حدود ۸۰ درصد) است. بطور کلی ارزیابی تنش برشی در بستر ناهموار رودخانه‌ها از نامطمئن‌تری بیشتری برخوردار است.

بر اساس نیاز طرح‌های رودخانه‌ای به ارزیابی پارامترهای جریان یک و دوبعدی (در کنارهای رودخانه)، کاربرد هر یک از سه مدل ریاضی HEC-RAS، BRI-STARS و FAST-2D به ترتیب برای ارزیابی

مترمکعب بر ثانیه) مدل دو بعدی FAST-2D، و در دبی‌های بالاتر (۱۵۰، ۲۱۰ و ۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه) مدل یک بعدی HEC-RAS مطابقت بیشتری با مدل فیزیکی داشته‌اند. رژیم جریان در بازه بالادست و پائین دست پل نازلو برای شرایط مختلف جریان بصورت زیربحرانی با عدد فرود در محدوده (0.3-0.6) است. در موقعیت پل، جریان در دهانه پل بصورت فوق بحرانی درآمده و بر روی رادیه پل بسمت پائین دست آبشار می‌کند. روند جریان مختلط در ناحیه تاثیر پل نازلو در رودخانه نازلو و نیز در مدل فیزیکی مشاهده گردیده، و بخوبی با هر سه مدل ریاضی شبیه‌سازی شده است.

۳-۶- تنش برشی متوسط جریان

از نتایج جداول (۴) و (۵)، مدل دو بعدی، مدل شبه دوبعدی و مدل یک بعدی، بترتیب تطابق بهتری داشته، و متوسط خطای برآورد آنها در خارج از هندسه پل به ترتیب معادل ۶۹٪±، ۷۵/۵٪± و ۷۶٪± است. شکل (۷) بطور نمونه نشان می‌دهد که، روند شبیه‌سازی متوسط تنش برشی بستر از بالادست تا پائین دست پل نازلو بسیار مشابه با نتایج مدل فیزیکی بوده، و در عین حال برآورد سه مدل ریاضی بسیار نزدیک بهم می‌باشد.

ارزیابی متوسط تنش برشی بستر در محدوده پل (جریان عبوری از دهانه‌های پل) از نظر تئوری با معادلات حاکم بر مدل‌های ریاضی مورد نظر سازگاری ندارد. همچنین، ارزیابی تجربی تنش برشی از نتایج اندازه‌گیری پروفیل قائم سرعت در محیط پل نیز امکان‌پذیر نمی‌باشد. از اینرو مقایسه نتایج مدل‌های فیزیکی و ریاضی، و استناد به برآوردهای ارائه شده در جداول (۴) و (۵) یا در شکل نمونه (۷) برای ناحیه پل منطقی بنظر نمی‌رسد. برآورد تنش برشی جریان در زیربازه‌های بالادست و پایین دست پل با مدل‌های ریاضی بدلیل مبنای محاسباتی یکسان مطابقت خوبی دارد. اما بدلیل اینکه مبنای روش محاسباتی تنش برشی در مدل فیزیکی متفاوت از مدل‌های ریاضی است، لذا نتایج آنها با هم اختلاف زیادی نشان می‌دهد.

علیرغم پشتوانه تئوریک ارزیابی تجربی تنش برشی از توزیع عمقی سرعت (روش Wu and Rajaratnam, 2000)، نتایج حاضر نشان می‌دهد که برآورد تجربی متوسط تنش برشی در بسترهای ناهموار رودخانه با نامطمئن‌های زیادی همراه است. از سوی دیگر انتظار می‌رود که، محاسبات متوسط تنش برشی بستر از رابطه عمومی تنش برشی بکار رفته در هر سه مدل ریاضی فوق نیز از کفایت لازم برخوردار نباشد. از اینرو، قضاوت نهائی به مطالعات آینده واگذار می‌گردد.

FAST-2D در بازه رودخانه نازلو"، پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته سازه‌های آبی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ۱۷۷ صفحه.

یاسی، مهدی (۱۳۸۴)، "طراحی، ساخت و مطالعه مدل فیزیکی طرح ساماندهی رودخانه نازلو- در بازه پل نازلو با استفاده از سازه آب شکن"، گزارش نهایی طرح پژوهشی، گروه آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ۱۱۰ صفحه.

ASCE (2000), "Hydraulic modeling: concepts and practices", *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices* No. 97, ASCE, Virginia, USA, 580p.

Chen, Y.H., et al. (1985), "Salt river channelization Project: model study", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 111(2), pp. 267-283.

FHWA (2000), "*BRI-STARS, Bridge stream tube model for alluvial river simulation*", User's manual, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, USA, 300p.

USACE (2002), "*Hydraulic reference manual of HEC-RAS 3.1*", U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Washington D.C., USA, 320p.

Wenka, Th., et al. (1991), "Depth- average calculation of flow in river reaches with flood control and regulation structures", *Proceedings of the 25th IAHR Congress*, Tokyo, Japan, pp. 127-138.

Wright, N.G. (2001), "Conveyance implications for 2-D and 3-D modeling", *Report prepared for HR Wallingford and the Environmental Agency*, U.K., 40p.

Wu, S. and Rajaratnam, N. (2000), "A simple method for measuring shear stress on rough boundaries", *Journal of Hydraulic Research*, 38(5), pp. 399-400

Yasi, M. (1997), "Flow and bed geometry behind a groyne", *Ph.D. Thesis*, Dept. of Civil Engineering, Monash University, Melbourne, Australia, 300p.

Zhu, J. (1991), "FAST-2D: A computer program for numerical simulation of 2D in compressible flows with complex boundaries," *Report No. 690*, University of Karlsruhe, Germany, 60p.

خصوصیات جریان پایدار در رودخانه‌های با بستر نسبتاً پایدار، و با توجه به محدوده اطمینان ارائه شده در این بررسی (جدول ۵) توصیه می‌گردد.

۵- تشکر

نتایج ارائه شده در این مقاله از امکانات فیزیکی و دستاوردهای پژوهشی طرح "طراحی، ساخت و مطالعه مدل فیزیکی طرح ساماندهی رودخانه نازلو- با استفاده از سازه آب شکن"، توسط مولف اول مقاله، گروه آب- دانشگاه ارومیه استفاده نموده است. بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه ارومیه بدلیل پشتیبانی مالی طرح فوق تقدیر و تشکر می‌گردد. همچنین ارزیابی مدل‌های ریاضی از نتایج پایان نامه کارشناسی ارشد (رشته سازه‌های آبی) توسط مولف دوم این مقاله تحت راهنمایی مولف اول استخراج گردیده است.

پی‌نوشت‌ها

1. Hydrological Engineering Center- River Analysis System (HEC-RAS)
2. U.S. Army Corps of Engineers (USACE)
3. Energy
4. Pressure/weir
5. Federal Highway Administration (FHWA)
6. Flow Analysis Simulation Tool of 2 Dimensions (FAST-2D)
7. Krohne
8. Armfield

۶- مراجع

زندنیا، فرشید (۱۳۸۳)، "مقایسه خصوصیات جریان در شرایط بستر ثابت با دو مدل HEC-RAS و BRI-STARS و ارزیابی تغییرات بستر با مدل BRI-STARS در رودخانه‌های با بستر درشت دانه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته سازه‌های آبی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ۲۲۸ صفحه.

ماجدی اصل، مهدی (۱۳۸۴)، "مقایسه نتایج شبیه سازی خصوصیات جریان پایدار با مدل یک بعدی HEC-RAS و مدل دوبعدی

تاریخ دریافت مقاله: ۳۰ بهمن ۱۳۸۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۱ آذر ۱۳۸۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۲۳ اسفند ۱۳۸۵