

مقایسه جریان در مدل فیزیکی یک بازه رودخانه‌ای با سه مدل ریاضی برای دو گزینه ساماندهی

لیلا جلیلی^۱، مهدی یاسی^{۲*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه ارومیه

۲- استادیار مهندسی رودخانه، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

* ارومیه، دانشگاه ارومیه، صندوق پستی ۵۷۱۵۳-۱۶۵

m.yasi@urmia.ac.ir

چکیده- به‌کارگیری مدل‌های ریاضی در مهندسی رودخانه اجتناب‌ناپذیر است. هدف اصلی تحقیق حاضر، مقایسه ویژگیهای جریان در دو گزینه ساماندهی یک بازه رودخانه‌ای (سری آبشکن‌ها و دیوارهای ساحلی)، با استفاده از نتایج اندازه‌گیری در مدل فیزیکی و نتایج شبیه‌سازی شده با سه مدل ریاضی است. برای این منظور، مدل فیزیکی بستر ثابت بازه‌ای از رودخانه نازلو در محدوده پل نازلو در ارومیه (به طول ۱۲۰۰ متر با مقیاس افقی ۱:۱۰۰ و قائم ۱:۲۰)، ساخته و واسنجی و ارزیابی شده و ویژگیهای جریان پایدار در مدل فیزیکی پس از اعمال دو گزینه ساماندهی، برای چهار جریان سیلابی اندازه‌گیری و تحلیل شد. سه مدل ریاضی شناخته شده رودخانه‌ای (مدل یک‌بعدی HEC-RAS، شبه دو‌بعدی BRI-STARS و دو‌بعدی سطح افق FAST-2D) برای شبیه‌سازی جریان و مقایسه پارامترهای مشترک مد نظر قرار گرفت. بر اساس نتایج، مدل FAST-2D در گزینه ساماندهی با سری آبشکن‌ها، و مدل HEC-RAS در گزینه دیوارهای ساحلی، تطابق بهتری با نتایج مدل فیزیکی داشته است. کارایی مدل ریاضی BRI-STARS در درجه سوم قرار داشته است در این بررسی، پارامترهای مشترک جریان از چهار مدل مقایسه شده و خطای برآورد هر یک از سه مدل ریاضی ارائه شده است.

کلیدواژگان: مدل HEC-RAS، مدل BRI-STARS، مدل FAST-2D، رودخانه نازلو، آبشکن، دیوار ساحلی.

۱- مقدمه

مطالعه جریان یا انتقال رسوب در بازه‌ای از رودخانه از طریق ساخت مدل مشابه امکان‌پذیر است. مدل‌های فیزیکی بستر ثابت و تغییر شکل یافته برای مطالعه ویژگیهای جریان (مانند: عمق آب، سرعت جریان، تنش برشی و فشار) در رودخانه‌های با بستر نسبتاً پایدار

استفاده می‌شوند (Ettema et al., 2000). اصول و مراحل فرایند مدل‌سازی رودخانه‌ای به‌ترتیب عبارت است از: (۱) برقراری تشابه فرودی؛ (۲) برقراری جریان متلاطم کاملاً زیر در مدل؛ (۳) انتخاب مقیاس افقی براساس محدودیت‌های فیزیکی؛ (۴) انتخاب مقیاس عمودی بر اساس جریان متلاطم کامل و دقت وسایل اندازه‌گیری؛ (۵)

تحلیل جریان‌های مختلط (زیربحرانی - فوق بحرانی) در نزدیکی پل‌ها و سازه‌های تقاطعی در بازه‌ای از رودخانه پوتا برای جریان پایدار و با دبی ۱۰۰ ساله توسط USACE (2000) آزموده شد. در تحلیل جریان در محدوده پل از دو روش انرژی و فشار-سرریز استفاده شد و پروفیل سطح آب در بالادست و پایین‌دست پل با هم مقایسه شد. اختلاف زیادی بین پروفیل‌های سطح آب در دو روش فوق در بالادست پل و داخل دهانه پل مشاهده شد. در نتیجه توصیه شد که حالت واقعی جریان با قضاوت مهندسی و با توجه به شواهد فیزیکی تشخیص داده شود. در بازه‌های مارپیچ دقت محاسبات مدل HEC-RAS با کاهش فاصله بین مقاطع عرضی افزایش می‌یابد (USACE, 2002).

مفهوم شبه‌دوبعدی، کاربرد و حل معادلات یک‌بعدی با استفاده از فرضیه استقرار لوله‌های جریان (به‌موازات و همسایگی یکدیگر) در گستره عرضی رودخانه‌است. در این صورت توزیع عرضی پارامترهای جریان و رسوب را می‌توان ارزیابی کرد. مهمترین مدل شبه‌دوبعدی با کاربرد عمومی در مهندسی رودخانه، مدل BRI-STARS است که برای تحلیل جریان پایدار یا شبه‌پایدار آب و انتقال رسوب توسط سازمان فدرال بزرگراه‌های آمریکا (FHWA) در سال ۲۰۰۰ توسعه یافته است. نسخه اول این مدل به نام GSTARS در سال ۱۹۸۶ و نسخه دوم آن با قابلیت شبیه‌سازی مرفولوژیکی رودخانه در سال ۱۹۹۸ ارائه شده است (FHWA, 2000). در این مدل از معادلات یک‌بعدی انرژی و مومنتم، و معادلات پیوستگی رسوب یک‌بعدی و روابط مختلف بار رسوبی مواد چسبنده و غیرچسبنده استفاده شده است. این مدل می‌تواند محاسبات پروفیل سطح آب را در شرایط جریان‌های زیر بحرانی، فوق بحرانی و مختلط انجام دهد. با فرض

تنظیم زبری و مقاومت جریان بر اساس اطلاعات شاهد از پروفیل سطح آب در رودخانه؛ ۶) واسنجی مدل بر اساس سایر اطلاعات شاهد؛ ۷) تأیید کارکرد مدل بر اساس اطلاعات رودخانه‌ای؛ و ۸) کاربرد مدل برای شرایط مورد نظر (یاسی، ۱۳۸۴).

شبیه‌سازی ویژگی‌های جریان رودخانه‌ای، از طریق مدل‌های ریاضی (یک، دو و سه‌بعدی) امکان‌پذیر است. از میان مزایای مدل‌های ریاضی می‌توان به سادگی ساخت، قابلیت تغییر در هندسه مدل، هزینه و زمان کار کمتر اشاره کرد. مدل یک‌بعدی HEC-RAS (جایگزین مدل HEC-2 از سال ۱۹۹۳) توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی-انجمن مهندسی ارتش آمریکا (USACE) توسعه یافته است. این مدل قابلیت شبیه‌سازی جریان پایدار و جریان ناپایدار را در شرایط بستر ثابت و متحرک در جریان‌های زیر بحرانی، فوق بحرانی یا مختلط دارد. همچنین تحلیل هیدرولیکی پل، کالورت، سرریز، دیوار ساحلی و سازه‌های متقاطع دیگر و محاسبات بار رسوبی، آبشستگی و تغییرات رودخانه‌ای، از قابلیت‌های آن بشمار می‌رود (USACE, 2002). عمومیت کاربرد مدل، درجه اعتماد به نتایج آن، سادگی کاربرد، ارزانی و سهولت دسترسی به مدل و راهنمای کاربری آن، از امتیازهای این مدل است. طرح ساماندهی رودخانه سالت (آریزونا، آمریکا) توسط Chen et al. (1985) با استفاده از مدل فیزیکی بستر ثابت و با مقایسه با نتایج شبیه‌سازی مدل HEC-2 ارزیابی شده است. بر اساس این نتایج، رقوم متوسط سطح آب در مدل فیزیکی و در مدل ریاضی، تطابق خوبی داشته است. در پایین‌دست دیوار ساحلی، مدل ریاضی مقادیر ارتفاع سطح آب را بیشتر محاسبه کرد که دلیل اصلی آن، تغییرات شدید هندسه مقاطع عرضی در این بازه دانسته شده است. قابلیت مدل HEC-RAS در

سرعت را در گستره عرضی رودخانه دارند. مدل دوبعدی سطح افق FAST-2D در مؤسسه هیدرومکانیک دانشگاه کارلسروهه آلمان توسعه یافته و مشخصات آن توسط Zhu (1991) ارائه شده است. این مدل قابلیت حل معادلات حاکم پیوستگی و مومنتم را با روش عددی حجم محدود برای شرایط مرزی نامنظم رودخانه دارد. این مدل به زبان فرترن نوشته شده و قابلیت اصلاح و تطبیق با شرایط متنوع جریان را نیز دارد. شبیه‌سازی جریان پایدار و ناپایدار رودخانه راین با استفاده از FAST-2D و با انطباق شبکه عددی با خطوط منحنی شامل ۶۰ گره در عرض و ۲۴۰ گره در راستای جریان انجام و با جریان‌های شاهد مقایسه شده است. برای جریان پایدار، شرایط مرزی بالادست و پایین‌دست ثابت در نظر گرفته شد و برای جریان ناپایدار، مرز جریان ورودی در بالادست به صورت موج بلند (وضعیت فرضی جزر و مدی) در نظر گرفته شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده ویژگیهای جریان در مقاطع عرضی رودخانه با نتایج مدل ریاضی مقایسه شده که حداکثر خطا برای سرعت جریان برابر ۵/۴ درصد و برای ارتفاع سطح آب کمتر از ۰/۱ متر بوده است. شبیه‌سازی جریان در محدوده تأثیر آبشکن‌ها و نیز در سیلابدشت رودخانه‌ها رضایت‌بخش گزارش شده است (Wenka et al., 1991). شبیه‌سازی جریان با مدل FAST-2D تطابق خوبی با نتایج اندازه‌گیری در مدل فیزیکی بستر ثابت و در مدل فیزیکی بستر متحرک با حضور آبشکن‌ها داشته است (Yasi, 1997).

نتایج اندازه‌گیری ویژگیهای جریان در مدل فیزیکی بازه پل نازلو (رودخانه نازلو، ارومیه) در شرایط رودخانه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی سه مدل ریاضی HEC-RAS، BRI-STARS و FAST-2D مقایسه شد. به‌طور کلی در بازه مورد مطالعه، این سه مدل، به‌ترتیب بالا، تطابق بهتری

استقرار لوله‌های جریان در عرض رودخانه، می‌توان پارامترهای جریان را در چند زیرمقطع عرضی محاسبه کرد. برای یک لوله جریان، مدل به مدل یک‌بعدی تبدیل می‌شود. هنگامیکه از زیربرنامه روندیابی رسوب استفاده نشود، مدل، محاسبات هیدرولیکی را برای بستر ثابت انجام می‌دهد. توسعه کاربرد مدل BRI-STARS، سادگی کاربری، سهولت دسترسی به مدل و راهنمای کاربری آن، و محاسبه توزیع عرضی پارامترهای جریان آب و رسوب رودخانه از امتیازهای این مدل است. با وجود این نتایج مطالعات مستقل نشان می‌دهد که این مدل به‌خلاف مدل HEC-RAS، نسبت به عواملی مانند: موقعیت و فاصله مقاطع عرضی؛ اندازه گام زمانی هیدروگراف؛ شدت غیریکنواختی بازه؛ تعداد لوله‌های جریان (در شرایط تحلیل بستر متحرک)؛ شدت بار رسوبی در ورودی بازه؛ و نوع روابط بار رسوبی بسیار حساس است (زندنیا، ۱۳۸۳). 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. نتایج شبیه‌سازی ویژگیهای جریان پایدار و ناپایدار در دو بازه رودخانه‌ای نشان داد که کاربرد مدل HEC-RAS در بازه‌های غیریکنواخت‌تر و متاثر از پل و دیگر سازه‌های آبی، در جریان مختلط و برای جریان ناپایدار، مطمئن‌تر از مدل BRI-STARS بوده است (زندنیا، ۱۳۸۳). از سوی دیگر، شبیه‌سازی فرایندهای رسوبگذاری و آبشستگی موضعی با این مدل در رودخانه می‌سی‌سی‌پی (در سنت لوئیس- امریکا) موفقیت‌آمیز گزارش شده است (FHWA, 2000).

مدل‌های دوبعدی سطح افق با وجود پیچیدگی محاسباتی در حل عددی معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان، توانایی ارزیابی توزیع عمق، تنش برشی و متوسط عمقی

مقایسه گردیده است. ارتقای دانش کاربرد و درجه اعتماد مدل‌های ریاضی در طرح‌های ساماندهی رودخانه‌ها از اهداف اصلی این مطالعه به‌شمار می‌رود.

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 پایین‌دست پل) قرار دارد. پل نازلو به طول ۵۶ متر، با عرض عرشه ۸/۶ متر، با ۵ دهنه (به عرض ۹/۶ متر) و ۴ پایه مستطیلی با دماغه گرد (با ضخامت ۲ متر)، و زاویه پایه‌ها نسبت به عرشه پل حدود ۱۵ درجه قرار دارد. جانمایی پل نازلو نسبت به راستای عمومی رودخانه مناسب نبوده است. کف بستر در محدوده پل با ملات سنگ و سیمان به‌صورت رادیه‌های سنتی ساخته شده و دو آبشار ۲ متری همراه با حفره آبشستگی عمیق (بیش از ۴ متر) در پائین‌دست پل ظاهر شده است.

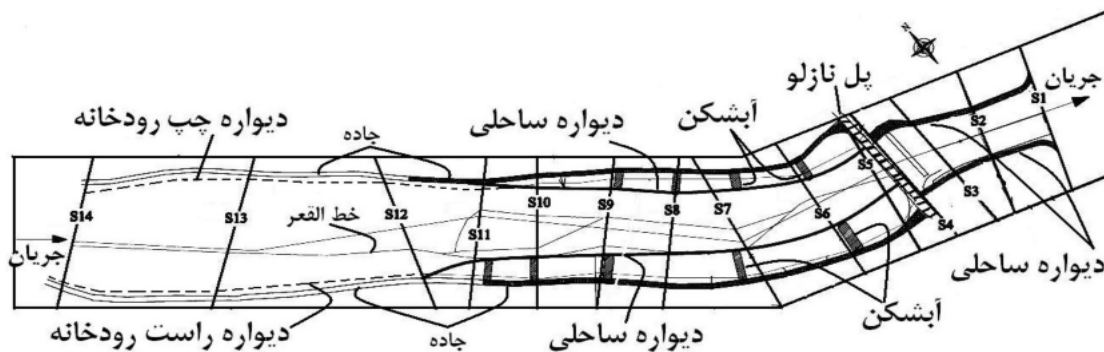
در این مطالعه از اطلاعات میدانی موجود (مانند: نقشه برداری ۱۴ مقطع عرضی و مقاطع طولی، برداشت جزئیات هندسی پل نازلو، نمونه‌برداری مواد بستری، نصب سه اشل سطح آب در مقاطع مختلف رودخانه، اندازه‌گیری مستقیم جریان رودخانه و ارزیابی رابطه دبی-اشل) استفاده شد (یاسی، ۱۳۸۴).

نمای عمومی رودخانه نازلو در بازه مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده و مشخصات هندسی و فیزیکی آن در جدول ۱ آورده شده است. ویژگی‌های فیزیکی مواد بستری بازه نازلو در جدول ۲ ارائه شده است. بستر رودخانه را شن درشت تا بسیار درشت همراه با بارهای رسوبی نامنظم (با پوشش گیاهی غالب گز) تشکیل می‌دهد.

با مدل فیزیکی داشته‌اند. متوسط خطای نسبی برآورد جریان از سه مدل فوق به‌طور نمونه برای ارتفاع سطح آب به ترتیب برابر ۱/۸، ۲/۲ و ۵/۵ درصد؛ و برای سرعت متوسط برابر ۱۰/۲، ۹/۰ و ۱۲/۶ درصد بوده است (یاسی و عزیزپناه، ۱۳۸۵).

در ساماندهی رودخانه نازلو در بازه پل نازلو، دو گزینه مد نظر قرار گرفت. در گزینه اول، استقرار دیوار ساحلی در ساحل چپ و راست؛ و در گزینه دوم ترکیبی از آبشکن‌ها در بالادست پل و دیوار ساحلی در پایین‌دست پل استفاده شد. ویژگی‌های جریان در مدل فیزیکی برای دو گزینه ساماندهی مقایسه و ارزیابی شد. براساس این نتایج، گزینه دوم ساماندهی (کاربرد آبشکن‌ها) نسبت به گزینه اول (دیوار ساحلی) به دلایل هیدرولیکی و نیز از نظر ریخت‌شناسی و زیبایی برتر شناخته شد (جلیلی و یاسی، ۱۳۸۷). برای گزینه دوم ساماندهی، ویژگی‌های جریان در مدل فیزیکی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی سه مدل HEC-RAS، BRI-STARS و FAST-2D توسط بیگی (۱۳۸۷) مقایسه شد. متوسط خطای نسبی برآورد جریان از سه مدل فوق به‌طور نمونه برای ارتفاع سطح آب به ترتیب ۱۴، ۱۰ و ۸ درصد؛ و برای سرعت متوسط برابر ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد بوده است.

هنوز درجه اعتماد کاربرد مدل‌های ریاضی پیچیده‌تر در رودخانه‌ها زیر سوال است، به‌طوری‌که هنوز نمی‌توان گفت که کاربرد مدل دوبعدی بر یک‌بعدی، و مدل سه‌بعدی بر دوبعدی برتری دارد (Wright, 2001). در تحقیق حاضر، ویژگی‌های جریان در مدل فیزیکی یک بازه پیچیده رودخانه‌ای (بازه پل نازلو، رودخانه نازلو)، با نتایج شبیه‌سازی سه مدل ریاضی یک‌بعدی (HEC-RAS)، شبه‌دوبعدی (BRI-STARS) و دوبعدی (FAST-2D)، تحت دو گزینه ساماندهی (آبشکن‌ها و دیوار ساحلی)



شکل ۱ نمای عمومی مدل رودخانه نازلو در دو گزینه ساماندهی (یاسی، ۱۳۸۴)

جدول ۱ ویژگیهای هندسی و فیزیکی بازه نازلو - رودخانه نازلو، در شرایط موجود و شرایط ساماندهی (یاسی، ۱۳۸۴)

ملاحظات	ضریب زبری مانینگ	مرز کنترل ساحل راست (m)	مرز کنترل ساحل چپ (m)	دیوار راست از سمت چپ (m)	دیوار چپ از سمت چپ (m)	موقعیت طولی (m)	مقطع عرضی
مقطع کنترل پایین دست	۰/۰۳۳	۱۱۰	۵۵	۱۱۴	۵۲	۰	S1
مقطع اشل (۳)	۰/۰۳۳	۱۰۸	۵۴	۱۱۱	۵۲	۷۲	S2
	۰/۰۲۵	۱۱۱	۵۲	۱۱۶	۴۲	۱۳۴	S3
مقطع پایین دست پل	۰/۰۲۵	۱۰۳	۴۷	۱۰۷	۴۱	۱۷۰	S4
محور پل نازلو	۰/۰۳۰	-	-	-	-	۱۸۱	Bridge
مقطع بالادست پل	۰/۰۳۰	۱۰۲	۴۶	۱۰۶	۴۳	۱۹۴	S5
	۰/۰۳۳	۱۱۶	۴۷	۱۴۲	۳۹	۲۸۰	S6
	۰/۰۳۳	۱۳۸	۴۴	۱۶۶	۲۶	۳۷۲	S7
	۰/۰۳۳	۱۱۸	۳۴	۱۴۹	۱۴	۴۵۲	S8
مقطع اشل (۲)	۰/۰۳۳	۱۲۲	۲۹	۱۴۰	۲۰	۵۲۴	S9
	۰/۰۳۳	۱۴۲	۳۹	۱۵۱	۳۱	۶۰۰	S10
	۰/۰۳۳	۱۴۴	۴۱	۱۵۱	۳۹	۶۶۳	S11
	۰/۰۳۳	۱۵۲	۲۶	۱۵۰	۲۲	۷۵۲	S12
	۰/۰۳۳	۱۷۲	۲۲	۱۷۴	۲۵	۹۴۳	S13
مقطع بالادست مدل	۰/۰۳۳	۱۵۸	۱۷	۱۵۸	۲۰	۱۱۱۱	S14
مقطع اشل (۱)	۰/۰۳۳			۱۳۴	۷	۴۴۳۷	S32

جدول ۲ ویژگیهای فیزیکی مواد بستری بازه نازلو - رودخانه نازلو (یاسی، ۱۳۸۴)

مواد بستری	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)	ضریب یکنواختی C _u	انحراف معیار هندسی σ _g	چگالی نسبی S _g	بافت مواد بستری (طبقه بندی AGU)
زیر سطحی	۰/۹	۱۷	۶۴	۳۰	۵/۵	۲/۶	شن درشت غیر یکنواخت (یکنواخت)
سطحی	۲۱	۴۱	۱۰۰	۲/۲	۱/۸	۲/۶	شن بسیار درشت (غیر یکنواخت)

در مطالعات پیشین یاسی (۱۳۸۴)، ضریب زبری مانینگ در بازه مورد مطالعه به طور مستقیم (با اندازه گیری همزمان شدت جریان رودخانه و ارتفاع سطح آب نظیر در محل سه اشل سطح آب در مقاطع بالادست، میانی و پایین دست رودخانه؛ با کاربرد مدل HEC-RAS (و به روش آزمون و خطا) ارزیابی شده، و با نتایج ۱۱ رابطه نیمه تجربی مختلف (از نوع معادلات استریکلر برای بسترهای شنی) مقایسه شده؛ و سرانجام با قضاوت مهندسی، تعیین شده است. بر این اساس مطابق جدول ۱، ضریب زبری مانینگ برای متوسط بستر جریان (کف و دیوار) در طول بازه برابر $0/033$ ، و در محدوده پل نازلو با کف بتنی از $0/025$ تا $0/030$ ارزیابی شده است.

مقیاس افقی (۱:۱۰۰) و مقیاس قائم (۱:۲۰) در آزمایشگاه هیدرولیک کاربردی دکتر جواد فرهودی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه توسط یاسی (۱۳۸۴) طراحی و ساخته شده است. دیوار بیرونی مدل از بلوک سیمانی و کف بستر از ملات ماسه و سیمان منطبق با توپوگرافی بستر و دیوار رودخانه ساخته شده است. این مطالعات برای جریان آب صاف (فاقد رسوبهای قابل ته نشینی) مورد نظر بوده است. مدل فیزیکی بازه نازلو با توجه به اطلاعات (دبی- اشل) در سه مقطع کنترل (اشل شماره ۱، ۲ و ۳ در جدول ۱) 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 شد (یاسی، ۱۳۸۴). کنترل سطح آب در پایین دست مدل از طریق دریچه کشویی انجام می شد. نمای مدل رودخانه در شکل ۱، و تصاویر مدل در شکل ۲ نشان داده شده است.

۱-۲- مدل فیزیکی

مدل فیزیکی بستر ثابت و تغییر شکل یافته رودخانه نازلو- در بازه پل نازلو با جزییات کامل هندسی بستر و پل نازلو، به طول کلی ۱۵ متر، با طول مؤثر ۱۲ متر و با



ب- گزینه دوم ساماندهی:

آبشکن ها در بالادست و دیوار ساحلی در پایین دست پل



الف- گزینه اول ساماندهی:

دیوار ساحلی در بالادست و پایین دست پل

شکل ۲ نمای مدل فیزیکی بازه پل نازلو، رودخانه نازلو، در دو گزینه ساماندهی (یاسی، ۱۳۸۴)

۲-۲- گزینه‌های ساماندهی

به منظور اصلاح مسیر بازه پل نازلو، دو گزینه ساماندهی مورد نظر قرار گرفت. در گزینه اول، حفاظت مستقیم از طریق ساخت دیوار ساحلی در امتداد مرز کنترل ساحل چپ و راست، در بالادست و پایین دست پل انجام شده است. در گزینه دوم، ترکیبی از آبشکن‌ها در بالادست پل (تعداد ۹ آبشکن با طول متوسط برابر ۲۴ متر و با نسبت متوسط فاصله به طول برابر ۵/۲)؛ و دیوار ساحلی در پایین دست پل استفاده شده است. در پایین دست پل نازلو، دیوار ساحلی در دو سمت رودخانه با ارتفاع متوسط ۱/۲ متر در نظر گرفته شده است. موقعیت و ارتفاع خط کنترل ساحلی رودخانه و ارتفاع سازه‌های حفاظتی توسط یاسی (۱۳۸۴) تعیین و در مطالعات تکمیلی توسط بیگی (۱۳۸۷) تنظیم و نهایی شده است. نمای مدل و تصاویر واقعی رودخانه در دو گزینه ساماندهی، به ترتیب در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است.

۲-۳- سیستم اندازه‌گیری

شدت جریان ورودی مدل با استفاده از دستگاه فراصوتی UFM-610P (از شرکت کراون آلمان) با دقت $\pm 2\%$ اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری عمق از یک عمق سنج نوک تیز (با دقت ± 0.1 mm)؛ و برای اندازه‌گیری سرعت از سرعت سنج مولینه‌ای (از شرکت آرمفیلد انگلستان با قطر پروانه برابر ۵ میلی‌متر و با دقت $\pm 5\%$) استفاده شده است.

عمق جریان در هر مقطع عرضی حداقل در ۱۲ امتداد اندازه‌گیری شده است. در هر امتداد عمقی، سرعت جریان به‌طور کلی در چهار موقعیت؛ برابر ۰/۲، ۰/۶ و ۰/۸ عمق از سطح آب، و ۵ میلی‌متری از کف بستر (نزدیکترین موقعیت مولینه‌ای از کف بستر) اندازه‌گیری شد. در

مواضعی که عمق آب کم بوده، اندازه‌گیری لزوماً در یک موقعیت عمقی (۵ میلی‌متری از کف بستر، یا ۰/۶ عمق از سطح آب) انجام شد.

۲-۴- روش تحلیل جریان

بر اساس نتایج اندازه‌گیری پارامترهای جریان در بازه نازلو (عمق جریان، سرعت و دبی جریان)، متوسط پارامترهای جریان در هر مقطع عرضی (در مقیاس مدل و نیز در مقیاس طبیعی رودخانه) محاسبه شده است.

روش محاسبه پارامترهای جریان به ترتیب عبارت است از: (۱) ارتفاع سطح آب در هر نقطه (h): از مجموع ارتفاع کف بستر رودخانه و عمق آب؛ (۲) ارتفاع متوسط سطح آب (H): از میانگین وزنی ارتفاعهای سطح آب در نقاط مختلف هر مقطع عرضی؛ (۳) عمق متوسط (D): از میانگین وزنی عمق‌های اندازه‌گیری شده در امتداد هر مقطع عرضی؛ (۴) سرعت متوسط عمقی (U_d): از متوسط سرعت‌های اندازه‌گیری شده در هر امتداد عمقی؛ (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 هر مقطع عرضی؛ (۶) عدد فرود (Fr): از محاسبات سرعت متوسط U و عمق متوسط (D؛ τ) تنش برشی متوسط بستر (τ): از رابطه $\tau = \gamma RS$ ، برای زیربازه‌های رودخانه محاسبه شد. توزیع

تنش برشی در بستر جریان، از روش Wu and Rajaratnam (2000) و با استفاده از نتایج اندازه‌گیری

سرعت در ۵ میلی‌متری از کف بستر محاسبه شده است. مطابق جدول ۳، چهار آزمون جریان (سیل ۲، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله) در این مطالعه در نظر گرفته شد. خطای اندازه‌گیری و تحلیل ویژگیهای جریان در مدل فیزیکی برای ارتفاع متوسط سطح آب و سرعت متوسط در هر

دماغه آبشکن‌ها عبور می‌کند و برای گزینه آبشکن‌ها و گزینه دیوار ساحلی مشترک است.

در مدل جریان دوبعدی سطح افق FAST-2D، معادلات حاکم با روش عددی حجم محدود حل می‌شود. شبکه محاسبات دوبعدی سطح افق از میان‌یابی مختصات سه‌بعدی توپوگرافی نقاط نقشه‌برداری شده از بستر رودخانه (x, y, z) ؛ با تعریف مرزهای هندسی نامنظم بستر در دو ساحل چپ و راست رودخانه، و در مقاطع عرضی بالادست و پایین‌دست بازه؛ و با هندسه جانمایی پل نازلو و سازه‌های ساماندهی رودخانه (آبشکن‌ها و دیوارهای ساحلی)، با استفاده از نرم افزار ANSYS ساخته شد. اندازه شبکه محاسبات عددی با رعایت حداقل سه سلول عددی در عرض پایه‌های پل و عرض سازه‌های آبشکن و دیوار ساحلی و براساس پایداری حل معادلات جریان تعیین شد. بر اساس نتایج حاصل، شبکه محاسبات عددی بر گستره مرزی مدل فیزیکی بازه نازلو برای گزینه اول ساماندهی (دیوارهای ساحلی) با اندازه (40×144) ؛ و برای گزینه دوم ساماندهی (آبشکن‌ها) با اندازه (40×167) تطبیق داده شد. مختصات سه‌بعدی گره‌های ایجاد شده در این شبکه (x, y, z) به‌عنوان فایل ورودی مدل دوبعدی سطح افق FAST-2D آماده و معرفی شد.

براساس اطلاعات ورودی مشترک هندسی و فیزیکی و شرایط اولیه و مرزی یکسان با مدل فیزیکی بازه نازلو، سه مدل ریاضی فوق تطبیق و اجرا شد. مقایسه نتایج مدل فیزیکی با سه مدل ریاضی بر اساس پارامترهای مشترک جریان یک‌بعدی (ارتفاع سطح آب، عمق متوسط، سرعت متوسط، عدد فرود، متوسط تنش برشی بستر)، در چهار شدت مختلف جریان (جدول ۳)، در دو گزینه ساماندهی بازه رودخانه انجام شده است. برای این منظور، اطلاعات اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی و نیز نتایج شبیه‌سازی

مقطع عرضی، به‌ترتیب حداکثر برابر $4/3$ و $6/1$ درصد برآورد شده است.

جدول ۳ آزمون‌های مختلف جریان در مدل بازه نازلو

ملاحظات	دبی (m^3/s)		آزمون
	در مدل فیزیکی	در رودخانه	
سیل ۲ ساله	$3^{-10} \times 12/4$	۱۱۰	۱
سیل ۱۰ ساله	$3^{-10} \times 23/6$	۲۱۰	۲
سیل ۲۵ ساله	$3^{-10} \times 33/7$	۳۰۰	۳
سیل ۵۰ ساله	$3^{-10} \times 46/0$	۴۱۰	۴

۲-۵- مدل‌های ریاضی

مدل ریاضی یک‌بعدی HEC-RAS و مدل شبه‌دوبعدی BRI-STARS برای شرایط هندسی، مرزی و هیدرولیکی مشترک با شرایط جریان پایدار در مدل فیزیکی بازه نازلو تطبیق و اجرا شد. در تطبیق مدل HEC-RAS، فاصله مقاطع عرضی حداکثر برابر ۸۱ متر (در مقیاس طبیعی) میان‌یابی شد. برای حل جریان در طول بازه رودخانه از گزینه جریان مختلط استفاده شده و مقاطع کنترل در بالادست و پایین‌دست بازه معرفی شد. برای حل جریان مختلط در محدوده پل از گزینه روش مومتم استفاده شد. در ساخت مدل BRI-STARS، بدلیل نبود قابلیت میان‌یابی مدل، مقاطع عرضی در موقعیت‌های برداشت زمینی به مدل معرفی شد. بهترین تطبیق مدل براساس انتخاب تعداد پنج لوله جریان در مقطع عرضی بازه رودخانه بود. برای حل جریان در طول بازه رودخانه از گزینه جریان مختلط استفاده شد. معرفی هندسه آبشکن‌ها در مدل‌های HEC-RAS و BRI-STARS به‌صورت تعریف خط کنترل ساحلی برای اصلاح مسیر رودخانه است که در جدول ۱ ارائه شده است. این خط کنترل از

اول، شامل احداث دیوار ساحلی در سواحل چپ و راست رودخانه و ساماندهی با گزینه دوم، شامل احداث چهار آبشکن در ساحل چپ و پنج آبشکن در ساحل راست رودخانه است. رژیم جریان در این بازه زیربحرانی است. راستای رودخانه در محدوده پل تا مقطع S8 تقریباً منحنی بوده و در دبی‌های بالاتر، پدیده برگشت آب تحت تاثیر پل در این زیربازه قابل ملاحظه است. راستای رودخانه در حد فاصل مقاطع S8 تا S11 تقریباً مستقیم بوده، و شدت تغییرات پارامترهای جریان در آن کم است. **زیربازه بالادست پل خارج از محدوده ساماندهی:** این زیربازه شامل مقاطع عرضی S12 تا S14 است. در این زیربازه راستای رودخانه نسبتاً مستقیم بوده، شدت تغییرات جریان در این امتداد کم بوده و رژیم جریان در آن زیربحرانی است.

تحلیل ویژگیهای جریان در محدوده زیر پل نازلو (به دلیل تغییرات سریع جریان در میانه پایه‌ها و بر روی آبشار پایین‌دست) با پیچیدگی بسیاری همراه بوده و از این رو ناگفته مانده است. نتایج اندازه‌گیری توزیع عمق و ارتفاع سطح آب و نیز توزیع عمقی سرعت جریان در گستره بازه بالادست و پایین‌دست پل با نتایج شبیه‌سازی از سه مدل ریاضی (شامل: ۱- ارتفاع سطح آب، ۲- عمق متوسط، ۳- سرعت متوسط جریان، ۴- عدد فرود، ۵- متوسط تنش برشی جریان) برای دو گزینه ساماندهی رودخانه، مقایسه و تحلیل شده است. همچنین ظرفیت انتقال جریان از بازه نازلو در مدل فیزیکی و مدل‌های ریاضی ارزیابی شده است. به‌طور نمونه برای دبی ۱۱۰ و ۲۱۰ مترمکعب بر ثانیه، روند تغییرات ارتفاع سطح آب و سرعت متوسط جریان در طول بازه رودخانه برای دو گزینه ساماندهی در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

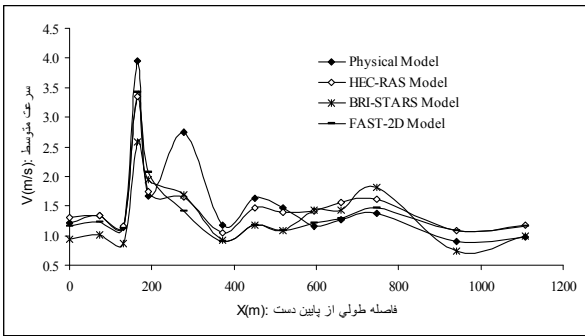
جریان در مدل‌های ریاضی، با استفاده از روش متوسط وزنی در عمق و عرض به اطلاعات و نتایج یک بعدی (در راستای عمومی جریان در بازه و در موقعیت مقاطع عرضی S1 تا S14) تبدیل شده و مقایسه شده است.

۳- نتایج و بحث

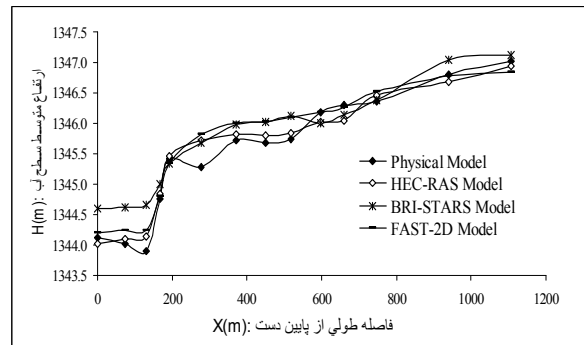
به‌منظور مقایسه ویژگیهای جریان و با توجه به شکل‌های ۱ و ۲ بازه مورد مطالعه بر اساس شدت تغییرات در پارامترهای جریان، نوع رژیم جریان زیربحرانی و فوق بحرانی، موقعیت پل نازلو و تاثیر گزینه‌های ساماندهی، به چهار زیربازه زیر تقسیم شده است.

زیربازه پایین‌دست پل: این بازه تقریباً مستقیم بوده و شکل مقاطع عرضی آن تقریباً یکنواخت است. این بازه شامل مقاطع S1، S2 و S3 بوده و رژیم جریان در آن زیربحرانی است. مطابق شکل (۱)، دیوار ساحلی در امتداد مرز کنترل ساحل چپ و راست قرار گرفته است. **محدوده پل نازلو:** پل نازلو در حد فاصل مقطع S4 (مقطع درست پایین‌دست پل) و مقطع S5 (مقطع درست بالادست پل) قرار دارد. مطابق شکل (۲) در شرایط جریانهای مختلف، جریان در محدوده پل مختلط و پیچیده است (در مقطع S4 جریان فوق بحرانی و در مقطع S5 جریان زیربحرانی). کاهش پلکانی ارتفاع کف رادیه سنگ و سیمانی پل با آبشار حدود ۲ متری سبب ایجاد جریان فوق بحرانی در پایین‌دست پل می‌شود. در پایین‌دست پل و در حد فاصل مقاطع S4 و S3 تغییر سریع جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی، با ایجاد جهش با تلاطم شدید و افت انرژی زیاد همراه است.

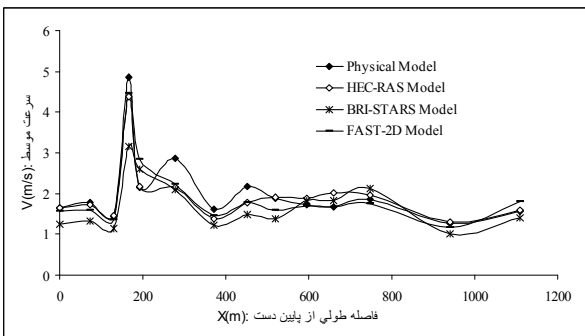
زیربازه بالادست پل در محدوده ساماندهی: این زیربازه در بالادست پل و حد فاصل مقاطع S6 تا S11 قرار دارد. مطابق شکل ۱ در این زیربازه ساماندهی با گزینه



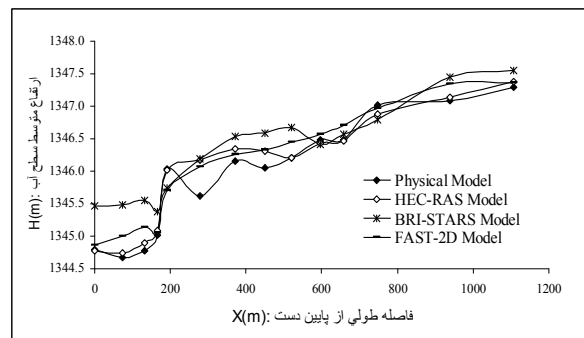
الف- گزینه اول ساماندهی ($Q=110 \text{ m}^3/\text{s}$)



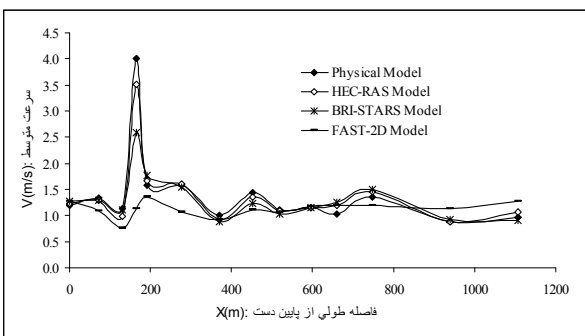
الف- گزینه اول ساماندهی ($Q=110 \text{ m}^3/\text{s}$)



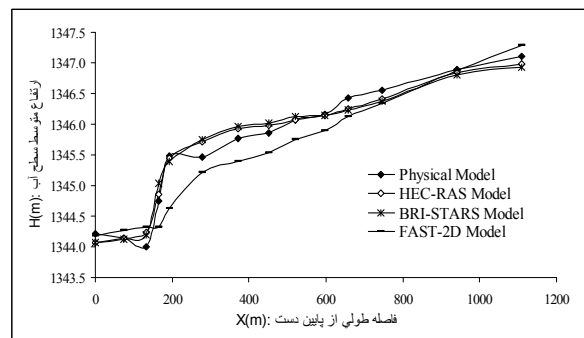
ب- گزینه اول ساماندهی ($Q=210 \text{ m}^3/\text{s}$)



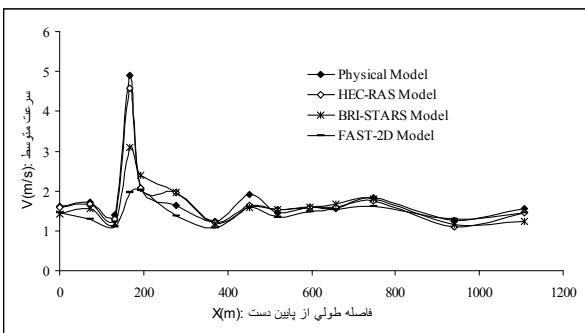
ب- گزینه اول ساماندهی ($Q=210 \text{ m}^3/\text{s}$)



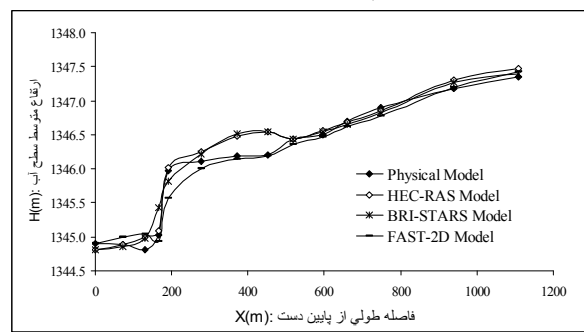
ج- گزینه دوم ساماندهی ($Q=110 \text{ m}^3/\text{s}$)



ج- گزینه دوم ساماندهی ($Q=110 \text{ m}^3/\text{s}$)



د- گزینه دوم ساماندهی ($Q=210 \text{ m}^3/\text{s}$)



د- گزینه دوم ساماندهی ($Q=210 \text{ m}^3/\text{s}$)

شکل ۴ مقایسه تغییرات سرعت متوسط در مدل فیزیکی و سه مدل ریاضی در دو گزینه ساماندهی بازه پل نازلو

شکل ۳ مقایسه تغییرات ارتفاع سطح آب در مدل فیزیکی و سه مدل ریاضی در دو گزینه ساماندهی بازه پل نازلو

۱-۳- ظرفیت جریان

در شرایط طبیعی و موجود، ظرفیت جریان در مدل فیزیکی، در پایین دست پل نازلو برابر ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه بوده که با تحلیل هیدرولیکی دو مدل ریاضی یک بعدی و شبه دویبعی مطابقت داشته، اما برآورد مدل دویبعی کمتر (برابر ۱۴۰ متر مکعب بر ثانیه) بوده است. ظرفیت جریان در بالادست پل، با مدل فیزیکی و دو مدل ریاضی یک بعدی و شبه دویبعی تقریباً یکسان و برابر ۲۵۰ متر مکعب بر ثانیه و با مدل دویبعی برابر ۲۴۰ متر مکعب بر ثانیه است (یاسی و عزیزپناه، ۱۳۸۵).

متوسط درصد تفاوت نسبی برآورد هر یک از پنج پارامتر متوسط جریان از سه مدل ریاضی در مقایسه با مدل فیزیکی برای چهار آزمون جریان در دو گزینه ساماندهی در طول بازه رودخانه، در جدولهای ۴ و ۵ ارائه شده است. خلاصه نتایج این بررسی در زیر تشریح و بحث می شود. 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 به ترتیب از عناوین مدل یک بعدی، مدل شبه دویبعی و مدل دویبعی استفاده خواهد شد.

جدول ۴ متوسط درصد تفاوت نسبی برآورد پارامترهای مشترک جریان از مدل های ریاضی نسبت به مدل فیزیکی در گزینه اول ساماندهی

پارامتر	زیر بازه	مدل های ریاضی		
		HEC-RAS	BRI-STARS	FAST-2D
ارتفاع سطح آب	بالادست پل بدون دیوار ساحلی	±۱۶	±۲۳	±۱۴
	بالادست پل با دیوار ساحلی	±۱۹	±۲۷	±۲۰
	پایین دست پل	+۹	+۳۸	+۱۵
عمق متوسط	بالادست پل بدون دیوار ساحلی	±۹	±۱۵	±۵
	بالادست پل با دیوار ساحلی	±۱۶	±۲۰	±۱۳
	پایین دست پل	±۷	±۱۹	±۹
سرعت متوسط	بالادست پل بدون دیوار ساحلی	±۱۰	±۱۷	±۹
	بالادست پل با دیوار ساحلی	±۱۶	±۲۰	±۱۴
	پایین دست پل	±۶	-۲۵	±۱۰
عدد فرود	بالادست پل بدون دیوار ساحلی	±۱۵	±۲۵	±۱۱
	بالادست پل با دیوار ساحلی	±۲۳	±۲۸	±۱۸
	پایین دست پل	±۹	-۳۱	±۱۴
تنش برشی متوسط بستر	بالادست پل بدون دیوار ساحلی	±۲۵	±۳۹	+۱۹
	بالادست پل با دیوار ساحلی	±۳۵	±۴۱	+۲۷
	پایین دست پل	±۱۴	-۴۶	+۲۱

جدول ۵ متوسط درصد تفاوت نسبی برآورد پارامترهای مشترک جریان از مدل‌های ریاضی

نسبت به مدل فیزیکی در گزینه دوم ساماندهی

پارامتر	زیربازه	مدل‌های ریاضی		
		HEC-RAS	BRI-STARS	FAST-2D
ارتفاع سطح آب	بالادست پل بدون آبشکن	± ۱۱	± ۱۱	± ۸
	بالادست پل با آبشکن	+ ۲۱	± ۱۳	± ۱۱
	پایین دست پل	± ۱۰	± ۹	± ۱۰
عمق متوسط	بالادست پل بدون آبشکن	± ۱۵	± ۱۱	± ۱۱
	بالادست پل با آبشکن	± ۱۹	± ۲۱	± ۱۰
	پایین دست پل	± ۸	± ۱۳	± ۹
سرعت متوسط	بالادست پل بدون آبشکن	± ۹	± ۱۱	± ۱۷
	بالادست پل با آبشکن	± ۱۰	± ۹	± ۱۷
	پایین دست پل	± ۹	± ۲۲	± ۱۸
عدد فرود	بالادست پل بدون آبشکن	± ۱۴	± ۱۵	± ۱۷
	بالادست پل با آبشکن	± ۱۵	± ۱۴	± ۱۹
	پایین دست پل	± ۱۳	± ۲۰	- ۱۵
تنش برشی متوسط بستر	بالادست پل بدون آبشکن	± ۲۱	± ۲۳	± ۳۹
	بالادست پل با آبشکن	± ۲۰	± ۲۴	± ۲۲
	پایین دست پل	± ۱۷	± ۳۵	± ۳۴

مکعب بر ثانیه (نظیر گزینه اول) برآورد شد. این شدت جریان با نتایج دو مدل شبه‌دوبعدی و دوبعدی مطابقت داشته است. اما مدل یک بعدی به دلیل برگشت قابل توجه آب در بالادست پل و در محدوده آبشکن‌ها، مقدار ظرفیت انتقال جریان را در بالادست پل نازلو کمتر و برابر ۳۵۰ متر مکعب بر ثانیه برآورد می‌کند. با وجود این نتایج مدل دوبعدی در پایین دست پل با مدل فیزیکی مطابقت دارد (بیگی، ۱۳۸۷).

۲-۳- ارتفاع سطح آب

نتایج جدول‌های ۴ و ۵ و شکل ۳ نشان می‌دهد که شبیه‌سازی ارتفاع سطح آب در محدوده‌های ساماندهی با

با اجرای گزینه اول ساماندهی و با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد مناسب در مدل فیزیکی (دیوارهای ساحلی)، مقدار ظرفیت انتقال جریان در کل بازه برابر ۴۱۰ متر مکعب بر ثانیه برآورد شده است. نتایج برآورد شده از تحلیل هیدرولیکی دو مدل شبه‌دوبعدی و دوبعدی، با نتایج مدل فیزیکی مطابقت داشته، اما مدل یک‌بعدی مقدار ظرفیت انتقال جریان را در بالادست پل نازلو برابر ۳۴۰ و در پایین دست پل برابر ۴۱۰ متر مکعب بر ثانیه برآورد می‌کند.

در گزینه دوم ساماندهی (آبشکن‌ها در بالادست پل)، ظرفیت انتقال جریان در مدل فیزیکی برای کل بازه مورد مطالعه (بالادست و پایین دست پل نازلو) برابر ۴۱۰ متر

برابر ۸، ۹ و ۱۳ درصد؛ برای بازه بالادست پل در محدوده ساماندهی ۱۹، ۱۰ و ۲۱ درصد؛ و برای بازه بالادست پل خارج از محدوده ساماندهی برابر ۱۵، ۱۱ و ۱۱ درصد برآورد شده است.

۳-۴- سرعت متوسط جریان

جدولهای ۴ و ۵ و شکل ۴ نشان می‌دهد که شبیه‌سازی سرعت متوسط جریان در مقاطع عرضی مختلف در محدوده ساماندهی با آبشکن‌ها یا دیوارهای ساحلی از مدل HEC-RAS، تطابق بهتری با نتایج مدل فیزیکی نسبت به دو مدل ریاضی دیگر داشته است. مقادیر خطای نسبی به تفکیک زیربازه‌ها در گزینه اول ساماندهی، به ترتیب برای مدل یک‌بعدی، دوبعدی و شبه‌دوبعدی برای بازه پایین‌دست پل برابر ۶، ۱۰ و ۲۵ درصد؛ برای بازه بالادست پل در محدوده ساماندهی برابر ۱۶، ۱۴ و ۲۰ درصد؛ و برای بازه بالادست پل خارج از محدوده ساماندهی برابر ۱۰، ۹ و ۱۷ درصد به دست آمده است. نتایج متناظر در گزینه دوم ساماندهی برای بازه پایین‌دست پل برابر ۹، ۱۸ و ۲۲ درصد؛ برای بازه بالادست پل در محدوده ساماندهی برابر ۱۰، ۱۷ و ۹ درصد؛ و برای بازه بالادست پل خارج از محدوده ساماندهی برابر ۹، ۱۷ و ۱۱ درصد برآورد شده است.

۳-۵- عدد فرود

جدولهای ۴ و ۵ نشان می‌دهد که در زیر بازه پایین‌دست پل، برآورد عدد فرود از مدل HEC-RAS بهتر است. در بازه بالادست پل در هر دو گزینه ساماندهی، نتایج برآورد عدد فرود از مدل FAST-2D تطابق بهتری با نتایج مدل فیزیکی داشته است. شبیه‌سازی دقیق‌تر پدیده برگشت آب در بالادست پل توسط مدل FAST-2D دلیل اصلی این

دیوار ساحلی از مدل HEC-RAS؛ و در محدوده ساماندهی با آبشکن‌ها از مدل FAST-2D، تطابق بهتری با نتایج مدل فیزیکی نسبت به دو مدل ریاضی دیگر داشته است

مقادیر خطای نسبی به تفکیک زیربازه‌ها در گزینه اول ساماندهی، به ترتیب برای مدل یک‌بعدی، دوبعدی و شبه‌دوبعدی برای بازه پایین‌دست پل برابر ۹، ۱۵ و ۳۸ درصد؛ برای بازه بالادست پل در محدوده ساماندهی برابر ۱۹، ۲۰ و ۲۷ درصد؛ و برای بازه بالادست پل خارج از محدوده ساماندهی برابر ۱۶، ۱۴ و ۲۳ درصد به دست آمده است. نتایج متناظر در گزینه دوم ساماندهی برای بازه پایین‌دست پل: ۱۰، ۱۰ و ۹ درصد؛ برای بازه بالادست پل در محدوده ساماندهی برابر ۲۱، ۱۱ و ۱۳ درصد؛ و برای بازه بالادست پل خارج از محدوده ساماندهی برابر ۱۱، ۸ و ۱۱ درصد برآورد شده است.

۳-۳- عمق متوسط آب

بر اساس جدولهای ۴ و ۵، در زیربازه پایین‌دست پل (با تغییرات نسبتاً یکنواخت مقاطع عرضی) نتایج برآورد عمق متوسط از مدل HEC-RAS، بهتر است. در بازه بالادست پل با تغییرات بیشتر در هندسه مقاطع عرضی، در هر دو گزینه ساماندهی نتایج برآورد مدل FAST-2D تطابق بهتری با نتایج مدل فیزیکی داشته است. مقادیر خطای نسبی به تفکیک زیربازه‌ها در گزینه اول ساماندهی، به ترتیب برای مدل یک‌بعدی، دوبعدی و شبه‌دوبعدی برای بازه پایین‌دست پل برابر ۷، ۹ و ۱۹ درصد؛ برای بازه بالادست پل در محدوده ساماندهی برابر ۱۶، ۱۳ و ۲۰ درصد؛ و برای بازه بالادست پل خارج از محدوده ساماندهی برابر ۹، ۵ و ۱۵ درصد به دست آمده است. نتایج متناظر در گزینه دوم ساماندهی برای بازه پایین‌دست پل

۳۹ درصد بدست آمده است. نتایج متناظر در گزینه دوم ساماندهی برای بازه پایین دست پل برابر ۱۷، ۳۴ و ۳۵ درصد؛ برای بازه بالادست پل در محدوده ساماندهی برابر ۲۰، ۲۲ و ۲۴ درصد؛ و برای بازه بالادست پل خارج از محدوده ساماندهی برابر ۲۱، ۳۹ و ۲۳ درصد برآورد شده است.

۴- نتیجه گیری

در شبیه سازی جریان رودخانه ای درجه اعتماد به کاربرد و نتایج مدل های ریاضی از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این بررسی، ویژگیهای جریان پایدار در بازه پل نازلو در رودخانه نازلو، تحت دو گزینه ساماندهی رودخانه در مدل فیزیکی مطالعه شده و با نتایج شبیه سازی سه مدل ریاضی یک بعدی (HEC-RAS)، شبه دو بعدی (BRI-STARS) و دو بعدی (FAST-2D) مقایسه شده است. متوسط درصد تفاوت نسبی برآورد هر یک از پنج پارامتر متوسط جریان از سه مدل ریاضی در مقایسه با مدل فیزیکی در دو گزینه ساماندهی بازه رودخانه، در جدولهای (۴) و (۵) ارائه شده است. متوسط خطای نسبی برآورد در شرایط مختلف جریان از سه مدل FAST-2D، HEC-RAS و BRI-STARS، به طور نمونه برای ارتفاع سطح آب، در گزینه اول ساماندهی (محدوده دیوارهای ساحلی) به ترتیب برابر ۲۰، ۱۹ و ۲۷ درصد؛ و در گزینه دوم ساماندهی (محدوده آبشکن ها) به ترتیب برابر ۱۱، ۲۱ و ۱۳ درصد است.

مدل HEC-RAS در بازه هایی با یکنواختی بیشتر، در شرایط ساماندهی با گزینه دیوارهای ساحلی و برای جریان سیلاب های کوچکتر، قابلیت بهتری را برای شبیه سازی بیشتر پارامترهای متوسط جریان (به ویژه ارتفاع سطح آب و سرعت متوسط) دارد. در بازه های با هندسه

تطابق به شمار می رود. مقادیر خطای نسبی به تفکیک زیربازه ها در گزینه اول ساماندهی، به ترتیب برای مدل یک بعدی، دو بعدی و شبه دو بعدی برای بازه پایین دست پل برابر ۹، ۱۴ و ۳۱ درصد؛ برای بازه بالادست پل در محدوده ساماندهی برابر ۲۳، ۱۸ و ۲۸ درصد؛ و برای بازه بالادست پل خارج از محدوده ساماندهی برابر ۱۵، ۱۱ و ۲۵ درصد به دست آمده است. نتایج نظیر در گزینه دوم ساماندهی برای بازه پایین دست پل برابر ۱۳، ۱۵ و ۲۰ درصد؛ برای بازه بالادست پل در محدوده ساماندهی برابر ۱۵، ۱۹ و ۱۴ درصد؛ و برای بازه بالادست پل خارج از محدوده ساماندهی: ۱۴، ۱۷ و ۱۵ درصد برآورد شده است.

۳-۶- تنش برشی متوسط بستر

بر اساس نتایج جدولهای ۴ و ۵، برآورد متوسط تنش برشی از مدل HEC-RAS در زیر بازه پایین دست پل (مقاطع یکنواخت تر) بهتر است. در محدوده بالادست پل با تغییرات بیشتر مقاطع عرضی، برای گزینه ساماندهی با آبشکن ها مدل HEC-RAS؛ و برای گزینه دیوارهای ساحلی مدل FAST-2D بهتر تطابق داشته است. دلایل عدم قابلیت شبیه سازی بهتر مدل FAST-2D نسبت به مدل HEC-RAS در گزینه ساماندهی با آبشکن ها برای مولفان این مقاله نامعلوم است. در هر دو گزینه ساماندهی، نتایج مدل BRI-STARS نسبت به دو مدل ریاضی دیگر ضعیف تر بوده است. مقادیر خطای نسبی به تفکیک زیربازه ها در گزینه اول ساماندهی، به ترتیب برای مدل یک بعدی، دو بعدی و شبه دو بعدی برای بازه پایین دست پل برابر ۱۴، ۲۱ و ۴۶ درصد؛ برای بازه بالادست پل در محدوده ساماندهی برابر ۳۵، ۲۷ و ۴۱ درصد؛ و برای بازه بالادست پل خارج از محدوده ساماندهی برابر ۲۵، ۱۹ و

هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور، تهران، آبان ۱۳۸۷، ص.ص. ۱۰۱-۱۰۸.

زندنیان، ف. (۱۳۸۳). "مقایسه ویژگیهای جریان در شرایط بستر ثابت با دو مدل HEC-RAS و BRI-STARS و ارزیابی تغییرات بستر با مدل BRI-STARS در رودخانه های با بستر درشت دانه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته سازه های آبی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ص. ۲۲۸.

ماجدی اصل، م. (۱۳۸۴). "مقایسه نتایج شبیه سازی ویژگیهای جریان پایدار با مدل یک بعدی HEC-RAS و مدل دوبعدی FAST-2D در بازه رودخانه نازلو"، پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته سازه های آبی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ص. ۱۷۷.

یاسی، م و عزیزپناه، ب. (۱۳۸۵). "مقایسه ویژگیهای جریان در مدل فیزیکی با نتایج مدل های ریاضی یک بعدی، شبه دوبعدی و دوبعدی- در یک بازه رودخانه"، مجله تحقیقات منابع آب ایران، انجمن علوم و مهندسی منابع آب، تهران، ایران، جلد ۲، شماره ۶، ص.ص. ۷۸-۸۹.

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

Chen, Y.H., et al. (1985). "Salt river channelization project: model study", J. Hydraulic Eng., 111(2), pp. 267-283.

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

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

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

غیریکنواخت، در شرایط ساماندهی با آبشکن ها و برای جریان سیلاب های بزرگتر، مدل FAST-2D قابلیت بهتری برای شبیه سازی بیشتر پارامترهای متوسط جریان دارد. همچنین شبیه سازی توزیع پارامترهای جریان در عرض رودخانه (به ویژه عمق و ارتفاع سطح آب و سرعت متوسط عمقی) با مدل FAST-2D رضایت بخش است. در مجموع، استفاده توأم از این دو مدل توصیه می شود. کاربرد مدل BRI-STARS، با استناد به محدوده خطای نسبی برآورد شده در جدولهای ۴ و ۵، در اولویت سوم قرار می گیرد.

۵- فهرست علائم

h	ارتفاع سطح آب در هر نقطه
H	ارتفاع متوسط سطح آب در مقطع عرضی
D	عمق متوسط آب در مقطع عرضی
U _d	سرعت متوسط عمقی در هر امتداد قائم
U	سرعت متوسط آب در مقطع عرضی
Fr	عدد فرود
τ	تنش برشی متوسط بستر
γ	وزن مخصوص آب
R	شعاع هیدرولیکی
S	شیب انرژی

۶- منابع

بیگی، ح. (۱۳۸۷). "مقایسه نتایج شبیه سازی ویژگیهای جریان پایدار از مدل های ریاضی با نتایج مدل فیزیکی در یک بازه رودخانه ای در شرایط ساماندهی"، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته سازه های آبی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ص. ۲۶۰.

جلیلی، ل. و یاسی، م. (۱۳۸۷). "مقایسه ویژگیهای جریان در مدل فیزیکی یک بازه رودخانه ای در دو گزینه ساماندهی".

Yasi, M. (1997). "Flow and bed geometry behind a groyne", PhD thesis, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Monash, Melbourne, Australia.

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

Wenka, T. (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., p. 40.

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.