

MDOI-01-2026.0142
MNR--1-3DA55A

مدل‌سازی عددی دوبعدی هیدرولیک جریان در اتصالات و تلاقی کانال‌های باز شهری و بهینه‌سازی سازه‌ای جهت جلوگیری از پس‌زدگی (مطالعه موردی: مسیل‌های مرکزی ایلام)

محمد حسین رحیمی

کارشناس عمران شهرداری ایلام – ارشد سازه های آبی

چکیده

شهر ایلام به دلیل توپوگرافی کوهستانی و بارش‌های رگباری در معرض سیلاب‌های ناگهانی مسیل‌های مرکزی است. اتصال و تلاقی این کانال‌ها از نقاط بحرانی جریان است، زیرا الگوی جریان در آن‌ها پیچیده می‌شود، جدایش جریان و افت انرژی موضعی رخ می‌دهد و تراز آب افزایش می‌یابد. در نتیجه پدیده پس‌زدگی (Backwater) می‌تواند به طغیان و خسارت منجر شود. در این پژوهش، جریان دوبعدی آب‌های کم‌عمق با حل معادلات سنت‌ونانت دوبعدی به روش حجم محدود بر شبکه بی‌سازمان شبیه‌سازی می‌شود. مدل با داده‌های توپوگرافی برداشت‌شده، مشخصات هندسی مقاطع و هیدروگراف‌های طراحی دوره‌های بازگشت مختلف واسنجی و اعتبارسنجی می‌شود. سپس سناریوهای سازه‌ای شامل اصلاح زاویه تلاقی، تغییر عرض و شیب کف، احداث دیواره‌های هدایت‌کننده و طراحی دریچه‌های تنظیم جریان ارزیابی می‌گردند. معیارهای ارزیابی شامل تراز حداکثر آب، سرعت جریان، وسعت پهنه‌های غرقاب و تنش برشی بستر است. بهینه‌سازی سازه‌ای با الگوریتم فراابتکاری و هدف کمینه‌سازی پس‌زدگی و هزینه اجرا انجام می‌شود. انتظار می‌رود نتایج، راهکاری کم‌هزینه و قابل اجرا برای کاهش ریسک سیلاب در تلاقی مسیل‌های ایلام و الگویی قابل تعمیم برای سایر شهرهای کوهستانی ارائه دهد.

کلیدواژه‌ها: مسیل‌های شهری؛ مدل دوبعدی هیدرولیک؛ پس‌زدگی جریان؛ بهینه‌سازی سازه‌ای؛ ایلام



۱ .مقدمه

۱-۱ .معرفی کلی موضوع

کانال‌ها و مسیل‌های باز شهری، مهم‌ترین مسیر هدایت رواناب سطحی در شهرهای کوهپایه‌ای‌اند. در این شهرها، رواناب حوضه‌های بالادست با سرعت زیاد وارد بافت متراکم شهری می‌شود. هرجا دو یا چند مسیل به هم برسند، الگوی جریان دیگر یک‌بعدی نیست. در تلاقی‌ها، جدایی جریان، ناحیه گردابی، لایه برشی، افت انرژی موضعی و تغییر سریع تراز سطح آب رخ می‌دهد. اگر رژیم جریان در شاخه اصلی یا شاخه فرعی زیربحرانی باشد، افزایش تراز در پایین‌دست به بالادست منتقل می‌شود. این پدیده پس‌زدگی نام دارد. هرچه نسبت دبی شاخه‌ها، زاویه تلاقی و محدودیت مقطع پایین‌دست بیشتر شود، پس‌زدگی شدیدتر است.

مدل‌های یک‌بعدی برای مسیرهای طولانی و نسبتاً مستقیم مناسب‌اند. اما در تلاقی‌ها، آبگذرها، پیچ‌ها و محل‌های سرریز به معابر نمی‌توانند توزیع عرضی سرعت و جریان ثانویه را بازتولید کنند. مدل‌سازی دوبعدی با حل معادلات متوسط‌گیری‌شده در عمق، توزیع مکانی عمق و سرعت، مسیر سرریز و ناحیه‌های رکود را نشان می‌دهد. هزینه محاسباتی آن نیز از مدل‌های سه‌بعدی بسیار کمتر است. بنابراین برای مطالعات کاربردی شهری انتخاب مناسبی است.

۱-۲ .اهمیت و ضرورت تحقیق

ایلام شهری با توپوگرافی ناهموار، شیب زیاد در حاشیه‌های شمالی و غربی و رشد سریع سطوح نفوذناپذیر است. گسترش ساخت‌وساز، کاهش نفوذپذیری و کاهش زمان تمرکز را به دنبال داشته و دبی اوج را افزایش داده است. همزمان، بخشی از مسیل‌ها با تجاوز به حریم، تنگ‌شدگی مقطع، ریخت‌وپاش نخاله و احداث آبگذرهای با ظرفیت کم محدود شده‌اند. نتیجه این روند، آب‌گرفتگی معابر، خسارت به املاک و تهدید ایمنی شهروندان در بارش‌های شدید است.

ضرورت پژوهش از چند جهت است:

ایمنی و اقتصاد شهری: سیلاب‌های شهری، خسارت مستقیم به ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها و خسارت غیرمستقیم به تردد و فعالیت اقتصادی وارد می‌کنند.

تغییر اقلیم: افزایش شدت بارش‌های کوتاه‌مدت، ظرفیت طراحی‌شده قبلی را بی‌اثر می‌کند.

خلأ مطالعاتی: مطالعات بسیاری برای شبکه‌های شهری انجام شده است، اما تحلیل دوبعدی تلاقی‌ها با تمرکز بر پس‌زدگی و ارزیابی هم‌زمان گزینه‌های سازه‌ای برای مسیل‌های ایلام کمتر دیده می‌شود.

محدودیت منابع: با بودجه محدود، انتخاب گزینه‌ای که بیشترین اثر را با کمترین هزینه داشته باشد، تصمیم‌گیری را علمی‌تر می‌کند.

۱-۳ .بیان مسئله

مسئله پژوهش این است که در تلاقی مسیل‌های مرکزی ایلام، ترکیب هندسه تلاقی، نسبت دبی شاخه‌ها و ظرفیت مقطع پایین‌دست چگونه به پس‌زدگی و سرریز منجر می‌شود. همچنین کدام مداخله سازه‌ای می‌تواند این پس‌زدگی را با هزینه معقول کاهش دهد، بدون آنکه مشکل را به پایین‌دست منتقل کند.

نکته اصلی این است که روش‌های طراحی رایج، تلاقی را معمولاً با ضریب افت موضعی ثابت یا با معادلات تجربی مبتنی بر آزمایشگاه‌های منشوری ساده تحلیل می‌کنند. در مسیل‌های ایلام، مقطع‌ها نامنظم، دیواره‌ها زبر، شیب کف متغیر و ورودی‌ها اغلب نامتقارن‌اند. بنابراین فرض‌های آن روابط نقض می‌شود و برآورد افت انرژی و تراز سطح آب خطا خواهد داشت. افزون بر آن، اصلاحات سازه‌ای محلی معمولاً بدون ارزیابی اثر آن‌ها بر کل شبکه اجرا می‌شود. گاهی گشادکردن یک آبگذر فقط نقطه تنگ را به پایین‌دست جابه‌جا می‌کند.

پژوهش حاضر با ساخت مدل دوبعدی واسنجی‌شده، پدیده را در شرایط واقعی بازسازی و سپس گزینه‌های مداخله را به‌صورت کمی مقایسه می‌کند.

۲ .اهداف و فرضیات

۲-۱ .تعریف متغیرها

برای روشن‌شدن منطق پژوهش، متغیرها پیش از بیان اهداف و فرضیه‌ها تعریف می‌شوند.

متغیرهای مستقل

۱ .دبی ورودی و دوره بازگشت: دبی اوج هر شاخه برای دوره بازگشت‌های ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله.

۲ .نسبت دبی شاخه فرعی به اصلی :(Qr) نسبت دبی شاخه جانبی به دبی شاخه اصلی در بالادست تلاقی.

۳ .زاویه تلاقی :(θ) زاویه بین محور شاخه فرعی و شاخه اصلی.

۴ .نسبت ظرفیت مقطع پایین‌دست :(Cr) نسبت ظرفیت عبوری مقطع پایین‌دست به مجموع دبی ورودی.

۵ .نوع مداخله سازه‌ای: وضعیت موجود، اصلاح زاویه، انتقال تدریجی مقطع، افزایش ظرفیت آبگذر، نرم‌سازی بستر و دیواره، حوضچه تعدیل و ترکیب‌های آن‌ها.

متغیرهای وابسته

۱ .طول پس‌زدگی :(Lb) فاصله‌ای از بالادست تلاقی که در آن تراز آب بیش از مقدار حالت بدون اثر تلاقی بالا آمده است.

۲ .بیشینه افزایش تراز سطح آب :(ΔH) اختلاف تراز آب در حالت تلاقی و حالت مبنا.

۳ .حجم و مساحت سرریز به معابر: شاخص مستقیم خطر سیلاب.

۴ .افت انرژی موضعی تلاقی :(ΔE) اختلاف انرژی ویژه قبل و بعد از تلاقی.

۵ .عدد فرود و بیشینه تنش برشی بستر: شاخص‌های رژیم جریان و پایداری بستر و پوشش.

۶ .شاخص اقتصادی (نسبت کاهش پس‌زدگی به هزینه): برای مقایسه گزینه‌ها.

متغیرهای مداخله‌گر و کنترل

۱ .زبری مانینگ: وابسته به جنس بستر، پوشش گیاهی و رسوب‌گذاری. در مدل با دامنه عدم‌قطعیت بررسی می‌شود.

۲ .انسداد ناشی از نخاله و زباله: کاهش مؤثر سطح مقطع آبگذرها، به‌صورت سناریوی درصدی (مثلاً ۱۰ و ۳۰ درصد) وارد می‌شود.

۳ .شرایط مرزی پایین‌دست: تراز آب یا شیب انرژی خروجی.

۴ .دقت شبکه محاسباتی و مدل ارتفاعی: اندازه سلول، دقت DEM و گام زمانی.

۵ .شکل هیدروگراف و همزمانی اوج شاخه‌ها: اختلاف زمانی رسیدن اوج دو شاخه.

۶ .شرایط رطوبت پیشین حوضه: اثر بر رواناب و در نتیجه بر دبی ورودی.

متغیرهای کنترل ثابت، شامل هندسه کلی کانال‌های بالادست دور از تلاقی و روش حل عددی، در همه سناریوها یکسان نگه داشته می‌شوند تا اثر متغیرهای مستقل جدا شود.

۲-۲ .هدف کلی

هدف کلی، شناخت سازوکار هیدرولیکی پس‌زدگی در تلاقی مسیل‌های مرکزی ایلام با مدل دوبعدی و تعیین مؤثرترین راهکار سازه‌ای برای کاهش آن است.

۲-۳ .اهداف اختصاصی



هدف ۱ (پیکربندی و اعتبارسنجی): ساخت مدل دوبعدی تلاقی‌های منتخب، واسنجی زبری و صحت‌سنجی با آثار تراز سیلاب، مشاهدات میدانی یا داده‌های موجود، و سنجش خطا با شاخص‌های RMSE و NSE.

هدف ۲ (شناسایی نقاط بحرانی): رتبه‌بندی تلاقی‌ها بر اساس طول پس‌زدگی، سرریز و خطر برای تعیین نقاط اولویت‌دار.

هدف ۳ (تحلیل حساسیت): تعیین سهم نسبی دبی، زاویه، نسبت دبی و ظرفیت پایین‌دست در شدت پس‌زدگی.

هدف ۴ (الگوی جریان): توصیف ناحیه جدایی، جریان ثانویه، تغییر رژیم و توزیع تنش برشی در تلاقی‌ها.

هدف ۵ (ارزیابی عدم‌قطعیت): بررسی اثر زبری و انسداد نخاله‌ای بر نتایج و تعیین حاشیه ایمنی.

هدف ۶ (طراحی و مقایسه گزینه‌ها): شبیه‌سازی گزینه‌های سازه‌ای و مقایسه آن‌ها از نظر هیدرولیکی، اجرایی و اقتصادی.

هدف ۷ (توصیه اجرایی): ارائه گزینه بهینه و ضوابط طراحی ساده برای مسیل‌های مشابه.

۲-۴ .سؤالات پژوهش

۱ .مدل دوبعدی تا چه حد قادر است تراز و گستره سیلاب مشاهده‌شده را بازتولید کند؟

۲ .کدام تلاقی‌ها بیشترین طول پس‌زدگی و سرریز را دارند و علت هیدرولیکی آن چیست؟

۳ .در محدوده شرایط مطالعه‌شده، کدام متغیر بیشترین اثر را بر پس‌زدگی دارد؟

۴ .آیا تلاقی‌های بحرانی در دبی‌های بالا از رژیم زیربحرانی به فوق‌بحرانی (یا برعکس) گذر می‌کنند و این گذر چه اثری دارد؟

۵ .انسداد جزئی آبگذرها و عدم‌قطعیت زبری چقدر نتیجه را تغییر می‌دهد؟

۶ .کدام گزینه سازه‌ای بیشترین کاهش پس‌زدگی را دارد و آیا اثر منفی بر پایین‌دست ایجاد می‌کند؟

۷ .کدام گزینه از نظر نسبت فایده به هزینه برتر است؟

۲-۵ .فرضیات پژوهش

فرضیه ۱: مدل دوبعدی واسنجی‌شده، تراز سطح آب را در نقاط مشاهداتی با خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد و ضریب NSE بالاتر از ۰/۸ بازتولید می‌کند.

فرضیه ۲: در تلاقی‌هایی که ظرفیت مقطع پایین‌دست کمتر از مجموع دبی ورودی است ($Cr < 1$)، طول پس‌زدگی نسبت به تلاقی‌های با $Cr \geq 1$ به‌طور معناداری بیشتر است.

فرضیه ۳: با افزایش نسبت دبی Qr ، پس‌زدگی در شاخه اصلی افزایش می‌یابد. این اثر در زاویه‌های نزدیک به ۹۰ درجه شدیدتر از زاویه‌های حدود ۴۵ درجه است.

فرضیه ۴: در این تلاقی‌ها، ظرفیت مقطع پایین‌دست و انسداد نخاله‌ای نسبت به زاویه تلاقی، سهم بیشتری در تغییرات ΔH دارند.

فرضیه ۵: ناهم‌زمانی اوج هیدروگراف شاخه‌ها، پس‌زدگی را نسبت به حالت هم‌زمان کاهش می‌دهد و فرض هم‌زمانی، طراحی محافظه‌کارانه ایجاد می‌کند.

فرضیه ۶: اصلاح زاویه تلاقی و انتقال تدریجی مقطع به‌تنهایی کمتر از ۲۵ درصد از طول پس‌زدگی را کم می‌کند، اما ترکیب آن‌ها با افزایش ظرفیت آبگذر، کاهشی بیش از ۵۰ درصد ایجاد می‌کند.

فرضیه ۷: افزایش ظرفیت منفرد آبگذر بدون هماهنگی با مقطع پایین‌دست، بخشی از افزایش تراز را به پایین‌دست منتقل می‌کند. گزینه ترکیبی با حوضچه تعدیل این انتقال را کاهش می‌دهد.

فرضیه ۸: گزینه ترکیبی بهینه، حتی با هزینه اجرایی بالاتر، به‌دلیل کاهش خسارت مورد انتظار، نسبت فایده به هزینه بزرگ‌تر از یک خواهد داشت.

۲-۶ .نکات روش‌شناختی برای رد یا پذیرش فرضیه‌ها

فرضیه‌های ۱ تا ۵ با خروجی مدل و آزمون‌های آماری (همبستگی، رگرسیون چندمتغیره، تحلیل واریانس یا شاخص‌های حساسیت) سنجیده می‌شوند.

فرضیه‌های ۶ تا ۸ با مقایسه درصد کاهش شاخص‌ها بین سناریوها و تحلیل هزینه–فایده بررسی می‌شوند.

آستانه‌های عددی (۱۰ درصد، ۰/۸، ۲۵ و ۵۰ درصد) مقادیر اولیه‌اند. پس از مرور منابع و برداشت داده‌ها قابل بازنگری‌اند و هرگونه تغییر باید در متن گزارش شود.

محدودیت‌های پژوهش شامل کمبود داده‌های ثبت‌شده سیل در ایستگاه‌های شهری، عدم‌قطعیت برآورد دبی و فرض بستر ثابت (بدون انتقال رسوب) است.

.مفاهیم کلیدی، مبانی نظری و پیشینه پژوهش

توضیح درباره متغیرها: در پیام شما عبارت «[متغیرها]» جایگزین نشده بود. بنابراین متغیرهای بخش ۲ را به کار بردم: دبی و دوره بازگشت، نسبت دبی (Qr) ، زاویه تلاقی (θ) ،

نسبت ظرفیت پایین‌دست(Cr) ، طول پس‌زدگی(Lb) ، افزایش تراز(ΔH) ، افت انرژی (ΔE)، عدد فرود، تنش برشی، زبری و انسداد.

۳-۱ .تعریف مفاهیم کلیدی

تلاقی کانال‌های باز. تلاقی نقطه‌ای است که یک یا چند کانال فرعی به کانال اصلی می‌پیوندند. در این نقطه سه شاخه دو ورودی و یک خروجی دارند. جریان در تلاقی ذاتاً سه‌بعدی است و با فرض یک‌بعدی به‌طور کامل توصیف نمی‌شود (Best & Reid, 1984; Hager, 2010). به همین دلیل مطالعه آن بر پایه دبی کل و دبی شاخه فرعی انجام می‌شود. یکی از مهم‌ترین پارامترها نسبت دبی(Qr) ، یعنی نسبت دبی شاخه فرعی به دبی کل، است. موسوی جهرمی و گودرزی‌زاده (۱۳۹۰) نیز تلاقی ۹۰ درجه را با همین منطق بررسی کرده‌اند.

پس‌زدگی .(Backwater) پس‌زدگی بالاآمدن تراز سطح آب در بالادست یک مانع هیدرولیکی است. مانع می‌تواند تنگ‌شدگی، آبگذر، پایین‌دست پرآب یا تلاقی باشد. اثر آن در جریان زیربحرانی به بالادست منتقل می‌شود، زیرا موج‌های سطحی می‌توانند خلاف جهت جریان حرکت کنند .(Chow, 1959; Henderson, 1966) در این پژوهش، طول پس‌زدگی (Lb) فاصله‌ای از بالادست تلاقی است که تراز آب در آن از حالت مبنا بیشتر باشد.

ناحیه جدایی جریان. پس از ورود شاخه فرعی، جریان از دیواره کانال اصلی جدا می‌شود و ناحیه‌ای با سرعت کم و گردش برگشتی تشکیل می‌دهد. این ناحیه مقطع مؤثر را کوچک می‌کند و سرعت در بقیه مقطع را افزایش می‌دهد. نتیجه آن افت انرژی موضعی و افزایش تراز بالادست است .(Best & Reid, 1984) آقازاده سوره و همتی (۱۳۹۷) شش ناحیه اصلی دینامیک تلاقی را فهرست کرده‌اند: رکود، انحراف، جدایی، بیشینه سرعت، بازیافت و لایه برشی.

عدد فرود و رژیم جریان. عدد فرود نسبت نیروی اینرسی به نیروی گرانش است : $Fr = V/\sqrt{(gD)}$. اگر $Fr < 1$ باشد جریان زیربحرانی است و اثر پایین‌دست به بالادست می‌رسد. اگر $Fr > 1$ باشد جریان فوق‌بحرانی است و این انتقال ممکن نیست. در مسیل‌های شیب‌دار ممکن است پرش هیدرولیکی رخ دهد و رژیم تغییر کند (Chaudhry, 2008).

مدل‌سازی دوبعدی متوسط‌گیری‌شده در عمق. این مدل بر پایه معادلات آب‌های کم‌عمق (Saint-Venant)دوبعدی (عمق و سرعت را در صفحه افقی محاسبه می‌کند. فرض اصلی آن توزیع فشار هیدرواستاتیک و یکنواخت‌بودن سرعت در عمق است (Vreugdenhil, 1994; Toro, 2001). این فرض برای جریان‌های کم‌عمق و گسترده شهری مناسب است. در نواحی با جریان ثانویه شدید، دقت آن محدود می‌شود.

واسنجی و صحت‌سنجی. واسنجی تنظیم پارامترهایی مانند زبری مانینگ است تا خروجی مدل با مشاهدات هماهنگ شود. صحت‌سنجی آزمون مدل با داده‌ای مستقل از واسنجی است. شاخص‌های رایج آن NSE (Nash & Sutcliffe, 1970) و RMSE هستند . Moriasiو همکاران (۲۰۰۷) معیارهای عملکردی برای تفسیر آن‌ها ارائه داده‌اند.

عدم‌قطعیت. عدم‌قطعیت شکاف بین خروجی مدل و واقعیت است. منابع آن زبری، هندسه یا DEM، شرایط مرزی و ساختار مدل‌اند.(Teng et al., 2017)

۳-۲ .مبانی نظری

۳-۲-۱ .قوانین بنیادین

پایه نظری همه مدل‌ها بقای جرم و بقای اندازه حرکت است. در تحلیل‌های کلاسیک تلاقی، معادله اندازه حرکت در حجم کنترل تلاقی نوشته می‌شود. از آن رابطه‌ای میان عمق بالادست و پایین‌دست و نسبت دبی به دست می‌آید Taylor (1944) .این روش را برای تلاقی مستطیلی زیربحرانی به کار برد Webber .و Greated (1966) آن را با ضرایب تجربی تکمیل کردند. این روابط بر کانال‌های منشوری هم‌عرض و بدون اصطکاک قابل‌توجه تکیه دارند. فرض‌های آن‌ها در مسیل‌های شهری واقعی کمتر برقرار است.

۳-۲-۲ .نظریه افت انرژی و پس‌زدگی

رویکرد دوم افت انرژی را با ضریب افت موضعی بیان می‌کند Hsu .و همکاران (۱۹۹۸) نشان دادند ضریب افت در تلاقی ۹۰ درجه زیربحرانی ثابت نیست و به Qr و عدد فرود وابسته است Gurram .و همکاران (۱۹۹۷) نیز معادله اندازه حرکت را برای تلاقی زیربحرانی به کار بردند. این یافته‌ها مبنای نظری فرضیه‌های ۲ و ۳ این پژوهش‌اند. طبق آن‌ها پس‌زدگی تابعی ازQr ، زاویه و شرایط پایین‌دست است.

۳-۲-۳ .نظریه ساختار جریان در تلاقی

Bestو Reid (1984) با آزمایش نشان دادند ابعاد ناحیه جدایی با افزایش زاویه تلاقی و Qrبزرگ‌تر می‌شود Best (1988) .به ریخت‌شناسی بستر و ساختار جریان در تلاقی رودخانه‌ها پرداخت Biron .و همکاران (۱۹۹۶) و Bradbrook و همکاران (۲۰۰۱) نقش

ناهم‌ترازی بستر شاخه‌ها را بررسی کردند. مبنای ارزیابی نقش «اختلاف رقوم» در این پژوهش همین مطالعات‌اند.

۳-۲-۴ .نظریه مدل‌سازی عددی سیلاب شهری

سیلاب شهری مجموعه‌ای از جریان‌های کم‌عمق روی معابر و جریان در کانال‌ها و آبگذرهاست. مدل‌های دوبعدی تعامل این اجزا را در مقیاس شهر نشان می‌دهند (Mignot et al., 2006). حل‌کننده HEC-RAS 2D معادلات را به روش حجم محدود و شبکه نامنظم حل می‌کند و امکان انتخاب معادلات کامل یا تقریب پخشی را فراهم می‌کند (Brunner, 2016). مبنای آن روش نیمه‌ضمنی Casulli (1990) است.

۳-۳ .پیشینه تجربی

۳-۳-۱ .پژوهش‌های خارجی

الف) مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی پایه Taylor (1944) .با آزمایش روی کانال‌های مستطیلی هم‌عرض و تلاقی با زاویه‌های ۴۵ و ۱۳۵ درجه، رابطه اندازه حرکت را برای نسبت عمق‌ها ارائه کرد Webber .و Greated (1966) این رابطه را با ضرایب تجربی بسط دادند Best .و Reid (1984) ناحیه جدایی را در زاویه‌های مختلف اندازه‌گیری کردند و آن را تابع زاویه و Qr یافتند Ramamurthy .و همکاران (۱۹۸۸) تلاقی ۹۰ درجه را بررسی کردند Hsu .و همکاران (۱۹۹۸) با اندازه‌گیری آزمایشگاهی ضریب افت را به Qr و Fr مرتبط دانستند.

مقایسه تحلیلی: این مطالعات نتایج سازگاری دارند. همگی نشان می‌دهند Qr و زاویه عوامل غالب‌اند. با این حال، همه آن‌ها از کانال‌های منشوری، زبری یکنواخت و هندسه ساده استفاده کرده‌اند. این وضع با مسیل‌های ایلام، که نامنظم و دارای تنگ‌شدگی و آبگذرند، تفاوت اساسی دارد.

ب) مدل‌سازی عددی تلاقی Weber .و همکاران (۲۰۰۱) داده‌های دقیق جریان در تلاقی ۹۰ درجه هم‌عرض را تولید کردند. این داده‌ها مرجع معتبرسازی بسیاری از مدل‌های عددی شد Huang .و همکاران (۲۰۰۲) با مدل سه‌بعدی RANS همین حالت را شبیه‌سازی و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند Bradbrook .و همکاران (۲۰۰۰) با شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) ساختار گردابی را بررسی کردند Shabayek .و همکاران (۲۰۰۲) مدلی پویا برای جریان زیربحرانی در تلاقی ارائه دادند Bradbrook .و همکاران (۲۰۰۱) نیز نقش ناهم‌ترازی بستر را بررسی کردند.

مقایسه تحلیلی: مدل‌های سه‌بعدی و LES ساختار جریان را دقیق‌تر نشان می‌دهند، اما بسیار پرهزینه‌اند و فقط برای بازه‌های کوتاه به کار می‌روند. مدل‌های یک‌بعدی ارزان‌اند ولی ساختار عرضی را از دست می‌دهند. مدل دوبعدی جایگاه میانی دارد. این جایگاه مبنای انتخاب روش در پژوهش حاضر است.

پ) سیلاب شهری و مدل‌های دوبعدی Mignot .و همکاران (۲۰۰۶) سیلاب شهری Nîmesرا با معادلات آب‌های کم‌عمق دوبعدی بازسازی کردند. نتیجه نشان داد مدل دوبعدی می‌تواند توزیع عمق و سرعت را در معابر پیچیده به‌خوبی نشان دهد Mignot .و همکاران (۲۰۰۸) تقاطع چهارشاخه شهری را در جریان فوق‌بحرانی آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند Hunter .و همکاران (۲۰۰۸) و Néelz و Pender (2013) نرم‌افزارهای دوبعدی را مقایسه کردند. این مطالعات نشان می‌دهند در جریان‌های متغیر سریع، تفاوت میان حل‌کننده‌ها قابل‌توجه است Leandro .و همکاران (۲۰۰۹) مدل‌های جفت‌شده شبکه فاضلاب و سطح را مقایسه کردند Schmitt .و همکاران (۲۰۰۴) سیلاب شهری را به‌صورت اندرکنش سطح و زیرزمین تحلیل کردند Teng .و همکاران (۲۰۱۷) در مرور خود زبری، DEMو شرایط مرزی را منابع اصلی عدم‌قطعیت دانستند.

مقایسه تحلیلی: مطالعات شهری بیشتر بر پهنه سیل و معابر تمرکز دارند و رفتار هیدرولیکی تلاقی را با جزئیات کافی بررسی نمی‌کنند. مطالعات تلاقی نیز معمولاً شهری و با هندسه واقعی نیستند.

۳-۳-۲ .پژوهش‌های داخلی

موسوی جهرمی و گودرزی‌زاده (۱۳۹۰) تلاقی ۹۰ درجه دو کانال مستطیلی را با نرم‌افزار Fluent 6.3و مدل آشفتگی تنش رینولدز سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. جریان ماندگار بود و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی Shiomit اعتبارسنجی شد. مدل الگوی کلی جریان را در حد مناسب بازتولید کرد.

آقازاده سوره و همتی (۱۳۹۷) اثر زاویه تلاقی (۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه) را در تلاقی‌های همکف و غیرهمکف با Flow-3D بررسی کردند. چهار نسبت دبی (۰/۲، ۰/۳۳، ۰/۵ و ۰/۶۷) و اختلاف رقوم‌های مختلف به کار رفت. مدل با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی داشت و تفاوت معناداری میان دینامیک تلاقی همکف و غیرهمکف مشاهده شد. نویسندگان خود اشاره کرده‌اند که مطالعات تلاقی غیرهمکف اندک است.



داوند و همکاران (۱۴۰۰) خطر سیلاب شهر ایلام را با مدل تابع شواهد قطعی (EBF) پهنه‌بندی کردند. عوامل مؤثر شامل شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه، تراکم آبراهه، لیتولوژی، کاربری اراضی و بارش بود. ۱۲۶ نقطه سیل‌گیر برای مدل‌سازی و اعتبارسنجی استفاده شد. مقدار AUC برابر ۰/۹۱۴ گزارش شد. سیل‌خیزی ایلام ناشی از شیب زیاد و تغییر کاربری اراضی دانسته شد.

مقایسه تحلیلی: پژوهش‌های داخلی تلاقی بر شبیه‌سازی سه‌بعدی نمونه‌های آزمایشگاهی تمرکز دارند. مطالعه ایلام نیز آماری و مکانی است و هیدرولیک جریان را حل نمی‌کند.

۳-۴ .نقد و جمع‌بندی

۱ .مقیاس و هندسه: بیشتر مطالعات تلاقی از کانال‌های آزمایشگاهی منشوری و ساده استفاده کرده‌اند. مسیل‌های شهری واقعی با زبری ناهمگن، آبگذر و انسداد بررسی نشده‌اند.

۲ .تمرکز بر ساختار جریان، نه پس‌زدگی: بیشتر پژوهش‌ها ساختار جریان یا ضریب افت را بررسی می‌کنند. طول پس‌زدگی و سرریز به معابر به‌ندرت متغیر وابسته بوده است.

۳ .جداافتادگی دو شاخه پژوهشی: پژوهش‌های تلاقی و پژوهش‌های سیلاب شهری عمدتاً جدا از هم انجام شده‌اند.

۴ .نبود ارزیابی سازه‌ای مقایسه‌ای: در منابع مرورشده، مقایسه چندگزینه‌ای مداخله‌های سازه‌ای با شاخص هیدرولیکی و اقتصادی همزمان دیده نشد. این گزاره بر پایه مرور حاضر است و باید با جستجوی نظام‌مند تکمیل شود.

۵ .داخلی و ایلام: برای ایلام فقط پهنه‌بندی آماری یافت شد. مدل هیدرودینامیکی دوبعدی تلاقی مسیل‌ها در دسترس نبود.

۶ .عدم‌قطعیت: اثر انسداد آبگذر و زبری در تلاقی‌ها کمتر بررسی شده است.

۵-۳ .شکاف پژوهشی، ضرورت و نوآوری

شکاف پژوهشی:

نبود تحلیل دوبعدی واسنجی‌شده تلاقی مسیل‌های شهری با هندسه واقعی در ایلام.

نبود تحلیل هم‌زمانQ_r ، θ، C_rو انسداد روی طول پس‌زدگی.

نبود مقایسه کمی هیدرولیکی-اقتصادی گزینه‌های سازه‌ای برای مسیل‌های ایلام.

ضرورت: ایلام به دلیل شیب زیاد، گسترش سطوح نفوذناپذیر و محدودشدن مسیل‌ها در برابر سیلاب آسیب‌پذیر است (داوند و همکاران، ۱۴۰۰). پایه علمی تصمیم‌گیری برای طراحی تلاقی‌ها کافی نیست.



نوآوری:

۱ .بازتولید پس‌زدگی در تلاقی‌های واقعی با مدل دوبعدی.

۲ .تحلیل هم‌زمان متغیرهای مستقل و مداخله‌گر.

.ارزیابی چندگزینه‌ای سازه‌ای با شاخص هزینه—فایده.

۴. ارائه ضوابط ساده برای مسیل‌های مشابه.

روش‌شناسی

یادآوری: این بخش طرح اجرایی پژوهش را شرح می‌دهد. برخی تصمیم‌ها، مثل منبع داده‌های مشاهده‌ای و مدل‌های واسنجی، هنوز قطعی نشده‌اند. اگر هنگام اجرا چیزی تغییر کرد، متن باید با اجرای واقعی تطبیق داده شود.

۴-۱ .نوع تحقیق

پژوهش از نظر هدف کاربردی است، چون به تصمیم‌گیری درباره طراحی و اصلاح تلاقی‌های شهری کمک می‌کند. از نظر ماهیت و روش تحلیلی-عددی است. در آن رفتار هیدرولیکی با مدل‌سازی دوبعدی بازسازی می‌شود و اثر متغیرها با سناریوسازی کنترل‌شده سنجیده می‌شود. از نظر زمان و مکان، گردآوری داده‌های میدانی توصیفی-مشاهده‌ای است. رویکرد کلی کمّی است و روش ترکیبی به‌کار نرفته است. مشاهده‌های میدانی و نظر کارشناسان فقط برای شناسایی نقاط بحرانی و تأیید ورودی‌های مدل استفاده می‌شوند و به‌عنوان داده کیفی مستقل تحلیل نمی‌شوند. طرح پژوهش شبه‌تجربی رایانه‌ای است: متغیرهای مستقل در مدل دستکاری می‌شوند و متغیرهای مداخله‌گر یا ثابت نگه داشته می‌شوند یا به‌صورت جداگانه تغییر داده می‌شوند.

۴-۲ .جامعه آماری و نمونه‌گیری

جامعه شامل همه تلاقی‌های مسیل‌ها و کانال‌های روباز و نیمه‌پوشیده در محدوده مرکزی شهر ایلام است که شاخه‌ای فرعی به شاخه اصلی می‌پیوندند.

نمونه‌گیری هدفمند و مرحله‌ای است، چون هدف بازتولید رفتار هیدرولیکی تلاقی‌های مسئله‌دار است و نه برآورد آماری برای کل جامعه. ابتدا فهرست همه تلاقی‌ها از نقشه‌های شهری، تصاویر ماهواره‌ای و مدل رقومی ارتفاع استخراج می‌شود. سپس تلاقی‌ها بر پایه این معیارها غربال می‌شوند:

سابقه ثبت‌شده آبگرفتگی یا سیلاب

اختلاف محسوس ظرفیت مقطع بالادست و پایین‌دست

وجود آبگذر یا تنگ‌شدگی در پایین‌دست
دسترسی به داده هندسی و مشاهده‌ای
تنوع زاویه و نسبت دبی میان نمونه‌ها

تلاقی‌هایی که سه معیار نخست را دارند و داده کافی برایشان فراهم است برای مدل‌سازی تفصیلی برگزیده می‌شوند. یک یا چند تلاقی که بهترین داده مشاهده‌ای را دارند برای واسنجی و صحت‌سنجی استفاده می‌شوند. تلاقی‌های دیگر برای آزمون قابلیت تعمیم به کار می‌روند. محدودیت این روش این است که نتایج به تلاقی‌های مشابه تعمیم‌پذیرند و به همه تلاقی‌های شهر تعمیم داده نمی‌شوند.

۴-۳ .ابزار و منابع گردآوری داده

داده‌ها از اسناد، اندازه‌گیری میدانی و مشاهده فراهم می‌شوند و پرسشنامه یا مصاحبه ساختاریافته به‌کار نمی‌رود.

۱ .هندسه: مدل رقومی ارتفاع با تفکیک مناسب از نقشه‌برداری یا پهپاد. مقاطع عرضی کانال‌ها، ابعاد آبگذرها و ساختمان‌های مجاور با برداشت میدانی) دوربین نقشه‌برداری یا GNSS)تکمیل می‌شوند.

۲ .هیدرولوژی: داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی و همدیدی منطقه، منحنی شدت-مدت-فراوانی و اطلاعات حوضه (کاربری، نوع خاک، شیب) از اسناد سازمان آب منطقه‌ای، هواشناسی و شهرداری.

۳ .داده مشاهده‌ای برای واسنجی: ردپای سیلاب (آثار تراز آب روی دیوارها و پل‌ها)، گزارش‌های رخداد، تصاویر ثبت‌شده و در صورت وجود، داده ایستگاه آب‌سنجی.

۴ .زبری و انسداد: بازدید میدانی و طبقه‌بندی پوشش بستر و دیواره، همراه با مستندسازی رسوب و زباله در آبگذرها.

۵ .ابزار پردازش: نرم‌افزار GIS برای پردازش داده مکانی، مدل بارش-رواناب برای دبی طراحی، مدل دوبعدی آب‌های کم‌عمق HEC-RAS 2D) یا معادل آن (برای شبیه‌سازی، و نرم‌افزار آماری برای تحلیل.

۴-۴ .مراحل اجرا

نخست داده‌ها پالایش و یکسان‌سازی می‌شوند. سپس دبی‌های طراحی برای دوره‌های بازگشت منتخب و هیدروگراف‌های شاخه‌ها تولید می‌شوند. بعد شبکه محاسباتی ساخته می‌شود و شرایط مرزی بالادست و پایین‌دست تعریف می‌شود. مدل با رخداد مشاهده‌شده واسنجی و با رخدادی مستقل صحت‌سنجی می‌شود. در ادامه ماتریس سناریو با تغییر

متغیرهای مستقل اجرا می‌شود. سپس نقاط بحرانی رتبه‌بندی می‌شوند و گزینه‌های سازه‌ای (بزرگ‌کردن آبگذر، اصلاح زاویه یا هندسه ورودی، حوضچه تعدیل و ترکیب آن‌ها) در مدل اعمال و مقایسه می‌شوند.

۴-۵ .روایی و پایایی

در مدل‌سازی عددی، روایی و پایایی به‌صورت زیر ارزیابی می‌شوند:

روایی محتوایی: ورودی‌ها و فرض‌ها به کارشناسان هیدرولیک و مدیریت شهری عرضه و بازبینی می‌شوند.

روایی سازه‌ای (صحت مدل): مقایسه خروجی مدل با مشاهدات مستقل با شاخص‌های نش-ساتکلیف و ریشه میانگین مربعات خطا. مقایسه با رابطه‌های کلاسیک تلاقی و داده‌های آزمایشگاهی شناخته‌شده نیز، پیش از به‌کارگیری روی مسیل‌های ایلام، آزمون اعتبار بنیادین انجام می‌دهد.

استقلال از شبکه محاسباتی: نتایج با ریزترکردن سلول‌ها آزمون می‌شوند تا مشخص شود نتایج به اندازه سلول وابسته نیستند.

پایداری عددی: بررسی بقای جرم، گام زمانی مناسب و شرط پایداری (عدد کورانت).

پایایی (تکرارپذیری): ثبت کامل ورودی‌ها و تنظیمات تا اجرای مجدد نتایج یکسان بدهد.

تحلیل حساسیت و عدم‌قطعیت: تغییر کنترل‌شده زبری، انسداد، شرط مرزی و تفکیک مدل رقومی، برای سنجش پایداری نتایج.

محدودیت روایی این است که داده مشاهده‌ای در مسیل‌های بدون ایستگاه اندک است و واسنجی بر ردپای سیلاب تکیه دارد.

۴-۶ .روش تحلیل داده‌ها

تحلیل در سه سطح انجام می‌شود. در سطح توصیفی، الگوی سرعت، عمق، ناحیه جدایی و پهنه آبگرفتگی در هر سناریو شرح داده می‌شود. در سطح تحلیلی، رابطه متغیرهای مستقل با طول پس‌زدگی، افزایش تراز و افت انرژی با همبستگی، رگرسیون چندمتغیره و تحلیل واریانس سنجیده می‌شود. شاخص‌های حساسیت سهم نسبی هر متغیر، از جمله مداخله‌گرها، را مشخص می‌کنند. در سطح تصمیم‌محور، گزینه‌های سازه‌ای بر پایه درصد کاهش پس‌زدگی و سرریز و نیز شاخص منفعت به هزینه مقایسه می‌شوند. فرضیه‌ها (H1 تا H8) در همین چارچوب آزمون می‌شوند و مرزهای آزمون فرضیه‌ها، که در بخش اهداف موقت بودند، پس از جمع‌آوری داده نهایی و اصلاح آن‌ها مستند می‌شود.

نتایج

هشدار صریح: این پژوهش هنوز اجرا نشده و من داده‌ای از مدل‌سازی ندارم. بنابراین متن زیر الگوی نتایج مورد انتظار است و بر پایه نظریه هیدرولیک تلاقی و پیشینه نوشته شده است. این متن گزارش یافته‌های واقعی نیست. پس از اجرای مدل باید هر گزاره با خروجی واقعی تأیید یا اصلاح شود و اعداد در همان زمان افزوده شوند. گزاره‌ای که تأیید نشد باید حذف یا معکوس شود. نتیجه نباید با این متن هماهنگ شود.

۵-۱ .اعتبار مدل

انتظار می‌رود مدل دوبعدی، پس از واسنجی، تراز ردپای سیلاب را در دامنه‌ای قابل‌قبول بازتولید کند. بیشترین اختلاف را باید نزدیک آبگذرها و تنگ‌شدگی‌ها دید. دلیل علّی آن این است که فرض فشار هیدرواستاتیک و یکنواختی سرعت در عمق در این نقاط، که جریان شتابدار و سه‌بعدی است، ضعیف‌تر برقرار است. هرگاه مدل در صحت‌سنجی مستقل نیز عملکرد مناسب نشان دهد، فرضیه نخست پذیرفته می‌شود. در غیر این صورت نتایج بعدی باید با احتیاط و تنها به‌صورت مقایسه‌ای خوانده شوند.

۵-۲ .نقش ظرفیت پایین‌دست

مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده پس‌زدگی باید نسبت ظرفیت پایین‌دست به جریان ورودی باشد. وقتی ظرفیت پایین‌دست کمتر از دبی ترکیبی است، جریان زیربحرانی نمی‌تواند عبور کند، تراز در محل تلاقی بالا می‌رود و اثر آن به بالادست هر دو شاخه منتقل می‌شود. در این وضع تغییر زاویه تلاقی اثر ثانویه دارد، چون عامل اصلی کمبود ظرفیت است و نه شکل ورودی. وقتی ظرفیت کافی است، پس‌زدگی ناچیز می‌ماند و تفاوت میان سناریوها بیشتر در افت موضعی و الگوی جریان دیده می‌شود. این پیش‌بینی با فرضیه دوم و چهارم هماهنگ است.

۵-۳ .اثر نسبت دبی و زاویه

افزایش سهم شاخه فرعی باید ناحیه جدایی را بزرگ‌تر کند و مقطع مؤثر را کاهش دهد. این کاهش مقطع سرعت را در بخش باقی‌مانده بالا می‌برد و افت انرژی را افزایش می‌دهد. زاویه بازتر، به‌دلیل مقابله بیشتر دو جریان، همین اثر را تشدید می‌کند. انتظار می‌رود اثر زاویه در نسبت دبی بالا آشکارتر باشد، یعنی میان این دو متغیر برهمکنش وجود دارد. اثر زاویه بدون در نظر گرفتن نسبت دبی را باید با احتیاط تفسیر کرد، چون ممکن است کم‌اثر دیده شود.

۵-۴ .همزمانی هیدروگراف‌ها

اگر اوج دبی دو شاخه هم‌زمان باشد، تراز تلاقی در بیشینه خود قرار می‌گیرد. اگر اوج‌ها فاصله داشته باشند، شاخه‌ای که زودتر می‌رسد پیش از رسیدن شاخه دیگر تخلیه می‌شود و پس‌زدگی کاهش می‌یابد. بنابراین اثر نسبت دبی به زمان‌بندی نیز وابسته است. اگر زمان تمرکز حوضه‌ها به هم نزدیک باشد، تفاوت زمانی اثر کمی خواهد داشت. این وضع در حوضه‌های شیب‌دار شمالی و غربی ایلام ممکن است رخ دهد و باید در داده‌ها بررسی شود.

۵-۵ .عوامل مداخله‌گر

زبری. زبری بیشتر سرعت را کم و عمق را زیاد می‌کند و طول پس‌زدگی را افزایش می‌دهد. با این حال، اثر آن با رژیم جریان تغییر می‌کند. در جریان نزدیک به بحرانی اثر زبری بر تراز قوی‌تر است.

انسداد آبگذر. انسداد، ظرفیت مؤثر پایین‌دست را به‌طور مستقیم کم می‌کند. به همین دلیل می‌تواند اثر ساختار هندسی را پوشش دهد: تلاقی خوش‌طرح با آبگذر مسدود ممکن است بدتر از تلاقی بدطرح با آبگذر آزاد عمل کند. این بخش مهم‌ترین تهدید برای تعمیم نتیجه‌های ناشی از سناریوهای بدون انسداد است.

شرط مرزی پایین‌دست. انتخاب تراز یا شیب در مرز خروجی، اگر نزدیک تلاقی باشد، پس‌زدگی را مصنوعاً تغییر می‌دهد. برای حذف این خطا مرز باید به‌اندازه کافی دور باشد و حساسیت آن آزمون شود.

تفکیک مدل رقومی و شبکه. هندسه خشن، تنگ‌شدگی‌ها و دیواره‌ها را غلط نشان می‌دهد و پهنه سرریز را دستخوش خطا می‌کند. این خطا بیشتر پهنه آبگرفتگی را متأثر می‌کند و کمتر طول پس‌زدگی را.

رطوبت پیشین. در رخدادهای نزدیک به هم، رواناب بیشتر می‌شود و دبی ورودی بزرگ‌تر از برآورد می‌ماند. این اثر ورودی را تغییر می‌دهد و مستقیم در هیدرولیک تلاقی دخالت ندارد.

۵-۶ .گزینه‌های سازه‌ای

بزرگ‌کردن تنها یک آبگذر باید پس‌زدگی بالادست آن را کاهش دهد، اما احتمالاً دبی را سریع‌تر به پایین‌دست منتقل می‌کند و گلوگاه بعدی را بحرانی‌تر می‌کند. به عبارت دیگر مشکل جابه‌جا می‌شود و حل نمی‌شود. اصلاح زاویه ورودی افت موضعی را کم می‌کند، اما در برابر کمبود ظرفیت اثر محدودی دارد. حوضچه تعدیل با کاستن از اوج دبی، فشار را از

پایین‌دست برمی‌دارد، اما به زمین و نگهداری نیاز دارد. ترکیب گزینه‌ها انتظار می‌رود مؤثرتر از هر گزینه تنها باشد، به شرط آن که به هم‌افزایی برسند و یکدیگر را خنثی نکنند. ارزیابی اقتصادی نیز می‌تواند ترتیب برتری را عوض کند: گزینه‌ای که هیدرولیکی بهتر است ممکن است از نظر هزینه توجیه نداشته باشد.

۵-۷ .جمع‌بندی علّی

زنجیره علّی مورد انتظار این است: کمبود ظرفیت پایین‌دست و انسداد، تراز را در تلاقی بالا می‌برند. افزایش نسبت دبی و بازشدن زاویه ناحیه جدایی را بزرگ می‌کنند و افت انرژی را شدت می‌دهند. زبری و شرایط مرزی میزان این اثر را تنظیم می‌کنند. همزمانی هیدروگراف‌ها شدت اوج را تعیین می‌کند. گزینه سازه‌ای مؤثر آن است که همزمان ظرفیت را افزایش دهد و اثر پایین‌دست را مهار کند. هر حلقه از این زنجیره فرضیه‌ای است که اجرای مدل باید آن را تأیید یا رد کند.

بحث و تحلیل

شرط استفاده از این بخش: مدل هنوز اجرا نشده و داده خامی در دست نیست. بنابراین این بخش چارچوب تفسیر شرطی است. برای هر فرضیه نوشته‌ام اگر خروجی مدل در یک جهت باشد چه معنایی دارد و اگر در جهت دیگر باشد چه معنایی. فرضیه‌ها را اکنون تأیید یا رد نمی‌کنم، چون این کار بدون داده ادعای ساختگی است. بعد از اجرا، سمت درست هر شرط را نگه دارید و سمت دیگر را حذف کنید. داده خام (مثلاً تراز اندازه‌گیری‌شده در هر ردپا و تراز محاسبه‌شده) باید در پیوست بیاید و در متن به آن ارجاع داده شود. منبع‌ها فقط از فهرست بخش ۳ آمده‌اند.

۶-۱ .تفسیر اعتبار مدل(H1) ، پرسش ۱

اگر شاخص‌های واسنجی و صحت‌سنجی هر دو در سطح قابل‌قبول باشند، می‌توان گفت فرض آب‌های کم‌عمق برای این مسیل‌ها کفایت می‌کند و H1 تأیید می‌شود. اگر واسنجی خوب ولی صحت‌سنجی ضعیف باشد، مدل به رخداد واسنجی «برازش بیش‌ازحد» شده و زبری جبران‌کننده خطای هندسه یا ورودی بوده است. این الگو با هشدار Teng و همکاران (۲۰۱۷) هم‌خوان است که زبری، DEMو شرط مرزی را منابع هم‌پوشان خطا می‌دانند. در این حالت H1 رد می‌شود. آن‌گاه باید بررسی شود که خطا نزدیک آبگذرها متمرکز است یا در کل بازه پخش شده است. تمرکز نزدیک آبگذر یعنی فرض فشار هیدرواستاتیک در جریان شتابدار نقض شده و استفاده از مدل سه‌بعدی موضعی توجیه دارد. پخش‌شدگی

یعنی مشکل از داده هندسی یا ردپاهای نامطمئن است. نکته مهم این است که ردپای سیلاب خود دارای عدم‌قطعیت است، چون ممکن است موج یا پاشش آن را بالاتر از تراز واقعی نشان دهد. پس مرز پذیرش باید با این عدم‌قطعیت سنجیده شود.

۶-۲ .ظرفیت پایین‌دست و انسداد(H2) ، H4، پرسش‌های ۲ و ۴

استدلال علّی این است که در جریان زیربحرانی اطلاعات تراز به بالادست می‌رسد(Chow, 1959; Henderson, 1966). پس هر کمبود ظرفیت پایین‌دست مستقیماً به تراز تلاقی تبدیل می‌شود، فارغ از شکل تلاقی. اگر در داده‌ها طول پس‌زدگی با کاهش نسبت ظرفیت به‌تدریج و آنگاه ناگهان زیاد شود، یعنی نقطه گذار وجود دارد، شاهد H2 است و با تغییر رژیم کنترل از تلاقی به پایین‌دست توضیح داده می‌شود. اگر رابطه خطی و ملایم باشد، سازوکار غالب افت اصطکاکی بازه است و نه کنترل پایین‌دست، و H2 تنها تا حدی پذیرفته می‌شود.

برایH4 ، شاخص حساسیت ظرفیت و انسداد باید با شاخص زاویه مقایسه شود. اگر سهم ظرفیت و انسداد بیشتر بود، تأیید می‌شود و نتیجه عملی آن است که اصلاح هندسه ورودی، پیش از رفع کمبود ظرفیت، بازده کمی دارد. اگر سهم زاویه بزرگ‌تر بود، باید بررسی شد که ظرفیت پایین‌دست در سناریوها واقعاً تنگنا بوده است یا نه؛ شاید ظرفیت بیش از حد بزرگ فرض شده باشد و H4 به‌دلیل طراحی سناریو رد شده باشد و نه ماهیت پدیده.

۶-۳ .نسبت دبی و زاویه(H3) ، پرسش ۳

پیشینه تلاقی نشان می‌دهد ناحیه جدایی با زاویه و نسبت دبی بزرگ می‌شود (Best & Reid, 1984)و ضریب افت به نسبت دبی و عدد فرود وابسته است (Hsu et al., 1998). اگر مدل دوبعدی این وابستگی را بازتولید کند، دو نتیجه به دست می‌آید: اعتبار فیزیکی مدل تقویت می‌شود و H3 تأیید می‌شود. اگر برهمکنش زاویه و نسبت دبی دیده شود، آن را باید با رشد ناحیه جدایی توضیح داد، چون این ناحیه تنها زمانی به اندازه کافی بزرگ می‌شود که تکانه شاخه فرعی بالا باشد. اگر زاویه بی‌اثر بماند، باید دید تفاوت در ناهم‌ترازی بستر یا در مرز بازه نبوده باشد؛ Bradbrook و همکاران (۲۰۰۱) نشان داده‌اند ناهم‌ترازی می‌تواند ساختار جریان را به‌طور مستقل تغییر دهد. توجه شود مدل دوبعدی متوسط‌گیری‌شده در عمق جریان ثانویه و چرخش مارپیچی را نمی‌گیرد، پس اگر نتیجه با مطالعات سه‌بعدی (مانند موسوی جهرمی و گودرزی‌زاده، ۱۳۹۰؛ آقازاده سوره و همتی،

۱۳۹۷) اختلاف جزئی داشته باشد، لزوماً ایراد نظری نیست و ممکن است محدودیت مدل باشد.

۶-۴ .همزمانی هیدروگراف‌ها(H5) ، پرسش ۵

اگر کاهش فاصله زمانی اوج‌ها، طول پس‌زدگی را بیشتر کند، H5تأیید می‌شود و توضیح آن انباشت دبی ترکیبی در لحظه محدودیت پایین‌دست است. اگر اثر ناچیز باشد، توضیح محتمل نزدیکی زمان تمرکز حوضه‌های شیب‌دار و در نتیجه تفاوت کم زمان رسیدن اوج‌هاست. این توضیح باید با داده حوضه بررسی شود و نباید فرض مسلم تلقی شود. این مورد نمونه‌ای از اثر مداخله‌گر است: رخداد بارش ناهمگن، رطوبت پیشین و کاربری، شکل هیدروگراف را عوض می‌کنند و ممکن است تفاوت ظاهری را به متغیر اشتباه نسبت دهند.

۶-۵ .گزینه‌های سازه‌ای (H6 تاH8 ، پرسش‌های ۶ و ۷

اگر بزرگ‌کردن یک آبگذر پس‌زدگی را در محل کاهش دهد ولی تراز را در پایین‌دست بالا ببرد، H7تأیید می‌شود و سازوکار آن انتقال گلوگاه است: افزایش ظرفیت یک مقطع، دبی را سریع‌تر به مقطع بعدی می‌رساند. این رفتار معمول سامانه‌های متوالی است و مطالعه یک نقطه آن را نشان نمی‌دهد. اگر حوضچه تعدیل جلوی این انتقال را بگیرد، دلیلش کاهش اوج دبی است و نه افزایش ظرفیت. اگر هیچ گزینه تنها به آستانه فرضیه نرسد و ترکیب برسد، H6تأیید می‌شود. اگر یک گزینه تنها آستانه را برآورده کند، H6رد می‌شود. برای H8، نسبت منفعت به هزینه به فرض‌های ارزش خسارت و عمر پروژه حساس است. پس باید با تحلیل حساسیت گزارش شود و تنها یک عدد قطعی ارائه نشود.

۶-۶ .محدودیت تفسیر و پیوند با نظریه‌های نو

برای ارتباط با رویکردهای جدیدتر، پیشینه شبیه‌سازی سیلاب شهری بر مقایسه حل‌کننده‌ها (Hunter et al., 2008; Néelz & Pender, 2013) و جفت‌سازی با شبکه زیرسطحی (Leandro et al., 2009) تأکید دارد. اگر نتایج به آبگذرها حساس بودند، یعنی اندرکنش با شبکه زیرزمینی مؤثر است، باید به‌عنوان محدودیت یاد شود. جستجوی نظام‌مند برای مقاله‌های جدیدتر (دهه اخیر) درباره یادگیری ماشین برای جایگزین‌سازی مدل هیدرودینامیکی هنوز انجام نشده است. پیش از نگارش نهایی باید آن را انجام دهید و ارجاع‌ها را فقط از منابع بررسی‌شده بیاورید.



نتیجه‌گیری

یادآوری: نتیجه‌گیری بدون یافته واقعی ممکن نیست. این متن ساختار پاسخ به اهداف را نشان می‌دهد و هر بند باید با نتیجه واقعی پر شود. جمله‌های شرطی را حذف و قطعی کنید.

۷-۱ .پاسخ به اهداف

هدف نخست (واسنجی و صحت‌سنجی). نتیجه‌گیری باید بگوید مدل دوبعدی برای مسیل‌های ایلام چه سطحی از دقت دارد و در کجا ضعیف است (نزدیک آبگذرها یا در کل بازه). این جمله باید همراه با میزان عدم‌قطعیت ردپاها بیاید، چون اعتبار هر یافته بعدی به آن وابسته است.

هدف دوم (رتبه‌بندی نقاط بحرانی). باید معلوم شود کدام تلاقی‌ها بیشترین پس‌زدگی و سرریز دارند و ویژگی مشترک آن‌ها چیست. اگر ویژگی مشترک کمبود ظرفیت پایین‌دست باشد، نتیجه عملی این است که معیار اولویت‌بندی بازسازی باید نسبت ظرفیت باشد و نه فقط زاویه.

هدف سوم (تحلیل حساسیت). ترتیب اهمیت متغیرها گزارش می‌شود: سهم ظرفیت پایین‌دست و انسداد، نسبت دبی، زاویه، زبری. هر جا ترتیب با نظریه تفاوت کرد، باید علت بیان شود.

هدف چهارم (الگوی جریان). ناحیه جدایی، شتاب جریان و محل افت موضعی توصیف می‌شود تا جایگاه طراحی اصلاحی روشن شود.

هدف پنجم (عدم‌قطعیت). باید مشخص شود کدام ورودی بیشترین اثر را بر خروجی‌ها دارد. اگر انسداد این نقش را داشته باشد، نتیجه عملی آن است که نگهداری آبگذرها در برنامه مدیریت سیلاب جایگاه ویژه دارد.

هدف ششم (مقایسه گزینه‌ها). باید گفته شود هیچ‌یک از گزینه‌ها تنهایی کافی هست یا نه، و هر گزینه چه چیزی را جابه‌جا می‌کند. هزینه و منفعت با فرض‌هایشان همراه بیایند.

هدف هفتم (توصیه عملی). توصیه‌ها باید به‌صورت ضابطه برای تلاقی‌های مشابه بیاید: مثلاً بررسی نسبت ظرفیت پیش از طراحی ورودی، یا الزام ارزیابی سامانه به‌صورت زنجیره و نه تک‌نقطه.

۷-۲ .محدودیت‌ها



۱ .داده مشاهده‌ای اندک. مسیل‌های ایلام ایستگاه آب‌سنجی ندارند و واسنجی به ردپای سیلاب و گزارش‌های رخداد تکیه می‌کند. این داده‌ها خود نامطمئن‌اند و دقت مدل را محدود می‌کنند.

۲ .فرض‌های مدل دوبعدی. جریان ثانویه، پرش هیدرولیکی شدید و هوازایی مدل‌سازی نمی‌شوند. در جریان‌های فوق‌بحرانی شیب‌دار شمال و غرب شهر این فرض‌ها ضعیف‌ترند.

۳ .نمونه محدود. تلاقی‌ها هدفمند انتخاب شده‌اند، پس تعمیم تنها به تلاقی‌های مشابه روا است و نه به کل شهر.

۴ .دبی طراحی. دبی از مدل بارش-رواناب می‌آید و همین مدل بدون واسنجی روی داده رواناب محلی خطا دارد. اثر این خطا در نتیجه آشکار است و نباید نادیده بماند.

۵ .انسداد فرضی. سناریوهای انسداد بر پایه مشاهده‌ای محدود طراحی شده‌اند و نمایانگر همه حالت‌ها نیستند.

۶ .اندرکنش زیرسطحی. شبکه فاضلاب و زهکشی بسته در مدل نیامده و این ممکن است ظرفیت واقعی تخلیه را بیش از حد کم یا زیاد نشان دهد.

۷ .جستجوی پیشینه. مرور ادبیات جستجوی نظام‌مند نبود و ادعای «نبود مطالعه» باید با آن تکمیل شود.

۷-۳ .پیشنهادهای پژوهشی

مدل جفت‌شده: اتصال مدل سطحی دوبعدی به شبکه زیرسطحی در همان بازه تا اثر ظرفیت واقعی زهکشی سنجیده شود.

مدل سه‌بعدی موضعی: اگر خطای مدل نزدیک آبگذر متمرکز بود، فقط همان بخش با مدل سه‌بعدی بازنگری شود تا هزینه محاسبه کم بماند.

اندازه‌گیری میدانی ماندگار: نصب چند حسگر تراز آب ارزان در تلاقی‌های بحرانی برای گرفتن داده واقعی رخدادهای بعدی و بهبود واسنجی.

مدل‌سازی انسداد پویا: به‌جای درصد ثابت، رابطه میان بارش، رواناب حامل رسوب و پر شدن تدریجی آبگذر بررسی شود.

آزمون جایگزین‌های داده‌محور: پس از وجود مجموعه‌ای از سناریوها، مدل جایگزین آماری آموزش داده شود تا ارزیابی سریع تلاقی‌های جدید ممکن شود. دقت آن باید با مدل دوبعدی کامل سنجیده شود.

ارزیابی تغییر اقلیم: سناریوهای شدت بارش آینده روی ظرفیت طراحی اعمال شود.

۷-۴ .پیشنهادهای کاربردی

۱ .ممیزی ظرفیت زنجیره‌ای. پیش از هر اصلاح تلاقی، ظرفیت همه مقطع‌ها تا نخستین نقطه تخلیه امن مقایسه شود تا مشکل جابه‌جا نشود.

۲ .برنامه پاک‌سازی پیش از فصل بارش. آبگذرهای دارای بیشترین حساسیت به انسداد فهرست شوند و پیش از فصل بارش بازرسی و لایروبی شوند. این اقدام کم‌هزینه‌تر از ساخت سازه است و، اگر حساسیت انسداد تأیید شود، اثر بزرگی دارد.

۳ .حوضچه تعدیل در شاخه فرعی. اگر مساحت زمین اجازه دهد، آن را بالادست تلاقی قرار دهید تا همزمانی اوج‌ها شکسته شود.

۴ .اصلاح هندسه ورودی پس از رفع ظرفیت. گرد کردن گوشه و کاهش زاویه ورودی فقط وقتی ارزش دارد که تنگنا برطرف شده باشد.

۵. ضابطه طراحی محلی. ضابطه ساده‌ای (نسبت حداقل ظرفیت پایین‌دست به مجموع دبی ورودی) برای تلاقی‌های جدید شهرداری تدوین شود. مقدار آن را از نتایج واقعی بگیرید و از این متن نگیرید.

منابع

آقازاده سوره، ت.، و همتی، م. (۱۳۹۷). بررسی عددی تأثیر زاویه تلاقی بر دینامیک جریان در تلاقی کانال‌های همکف و غیرهمکف) .نشریه ارجاع‌شده در پایگاه idser.areeo.ac.ir). https://doi.org/10.22092/aridse.2017.107415.1127

داوند، خ.، شهابی، ه.، و سالاری، م. (۱۴۰۰). پهنه‌بندی خطر سیلاب در شهر ایلام با استفاده از مدل تابع شواهد قطعی. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۰(۲)، ۱–۲۰ . https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.67947.1007

موسوی جهرمی، س. ح.، و گودرزی‌زاده، ر. (۱۳۹۰). شبیه‌سازی عددی الگوی جریان سه‌بعدی در تلاقی کانال‌های باز. علوم و مهندسی آبیاری، ۳۴(۲)، ۶۱–۷۰.

Best, J. L. (1988). Sediment transport and bed morphology at river channel confluences. Sedimentology, 35(3), 481–498.

Best, J. L., & Reid, I. (1984). Separation zone at open-channel junctions. Journal of Hydraulic Engineering, 110(11), 1588–1594.

Biron, P., Best, J. L., & Roy, A. G. (1996). Effects of bed discordance on flow dynamics at open channel confluences. Journal of Hydraulic Engineering, 122(12), 676–682.



Bradbrook, K. F., Lane, S. N., Richards, K. S., Biron, P. M., & Roy, A. G. (2001). Role of bed discordance at asymmetrical river confluences. Journal of Hydraulic Engineering, 127(5), 351–368.
Bradbrook, K. F., Lane, S. N., Richards, K. S., Biron, P. M., & Roy, A. G. (2000). Large eddy simulation of periodic flow characteristics at river channel confluences. Journal of Hydraulic Research, 38(3), 207–215.
Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS river analysis system: 2D modeling user's manual (Version 5.0). U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
Casulli, V. (1990). Semi-implicit finite difference methods for the two-dimensional shallow water equations. Journal of Computational Physics, 86(1), 56–74.
Chaudhry, M. H. (2008). Open-channel flow (2nd ed.). Springer.
Chow, V. T. (1959). Open-channel hydraulics. McGraw-Hill.
Gurram, S. K., Karki, K. S., & Hager, W. H. (1997). Subcritical junction flow. Journal of Hydraulic Engineering, 123(5), 447–455.
Hager, W. H. (2010). Wastewater hydraulics: Theory and practice (2nd ed.). Springer.
Henderson, F. M. (1966). Open channel flow. Macmillan.
Hsu, C.-C., Lee, W.-J., & Chang, C.-H. (1998). Subcritical open-channel junction flow. Journal of Hydraulic Engineering, 124(8), 847–855.