

MDOI-01-2026.0143
MNR--1-77820A

شبیه‌سازی اثر تجمع و گرفتگی دهانه پل‌ها و کالورت‌ها توسط نخاله‌ها و رسوبات دانه‌درشت بر پهنه‌بندی سیلاب شهری با استفاده از HEC-RAS 2D

محمد حسین رحیمی

کارشناس عمران شهرداری ایلام – ارشد سازه های آبی

چکیده

هدف این پژوهش شبیه‌سازی اثر تجمع و گرفتگی دهانه پل‌ها و کالورت‌ها توسط نخاله‌ها و رسوبات دانه‌درشت بر پهنه‌بندی سیلاب شهری با مدل دوبعدی HEC-RAS است. مسیل‌های شهری در مناطق کوهستانی مانند ایلام، به‌دلیل شیب زیاد و حمل مواد جامد، در محل سازه‌های عبوری دچار انسداد می‌شوند و این انسداد ظرفیت واقعی تخلیه را کاهش می‌دهد. روش پژوهش شامل سه مرحله است: تهیه مدل رقومی ارتفاع و هندسه سازه‌ها، واسنجی مدل با ردپای سیلاب، و تعریف سناریوهای انسداد با درصدهای مختلف سطح مقطع مؤثر. شبکه محاسباتی در محل سازه‌ها ریزتر انتخاب می‌شود. متغیر مستقل درصد انسداد و دوره بازگشت بارش است، و متغیرهای وابسته شامل گستره و عمق آبگرفتگی، تراز پس‌زدگی بالادست و سهم سرریز به معابر هستند. زبری مانینگ و شرط مرزی پایین‌دست به‌عنوان متغیرهای مداخله‌گر کنترل می‌شوند. انتظار می‌رود افزایش انسداد، پهنه سیل را به‌صورت غیرخطی گسترش دهد و آستانه‌ای وجود داشته باشد که پس از آن اثر انسداد شدید شود. نتایج احتمالی این پژوهش می‌تواند معیاری برای اولویت‌بندی پاک‌سازی و طراحی سازه‌ها فراهم کند. نوآوری پژوهش در ترکیب انسداد پیوسته با تحلیل پهنه سیل در مقیاس شهری است، زیرا بیشتر مطالعات انسداد را به‌صورت ثابت یا در مقیاس آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند. تأکید می‌شود که این چکیده بر پایه طرح پژوهش نوشته شده و یافته‌های عددی هنوز به‌دست نیامده‌اند.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی دوبعدی؛HEC-RAS ؛ سیلاب شهری؛ انسداد سازه؛ نخاله و رسوب



مقدمه

شهرهای کوهپایه‌ای مانند ایلام بر بستر مسیل‌ها و کانال‌های طبیعی توسعه یافته‌اند. در این شهرها، بسیاری از مسیل‌ها از زیر خیابان‌ها، میدان‌ها و پل‌های محلی عبور می‌کنند. آبگذرهای این مسیرها، یعنی دهانه پل‌ها و کالورت‌ها، معمولاً برای دبی طراحی ساخته می‌شوند که در آن فرض شده مقطع عبور کاملاً باز است. در عمل، جریان‌های سیلابی نخاله ساختمانی، زباله، شاخه درختان، و رسوبات دانه‌درشت با خود حمل می‌کنند. این مواد در ورودی آبگذر جمع می‌شوند و بخشی از مقطع مؤثر را می‌بندند. نتیجه آن کاهش ظرفیت تخلیه، بالا آمدن تراز آب در بالادست و گسترش پهنه سیلاب در معابر مجاور است.

مدل‌های دوبعدی آب‌های کم‌عمق، مانندHEC-RAS 2D ، امکان می‌دهند این پدیده در مقیاس شهری بازنمایی شود. این مدل‌ها جریان را در صفحه افقی حل می‌کنند و مسیر آب در کوچه‌ها و معابر را نشان می‌دهند. با این حال، بیشتر کاربردهای شهری این مدل‌ها آبگذرها را بدون انسداد یا با انسداد ثابت و قراردادی مدل‌سازی می‌کنند. در نتیجه، پهنه‌بندی سیلاب تهیه‌شده ممکن است ظرفیت واقعی را بیش از حد نشان دهد و کسانی که از روی آن اقدام می‌کنند، برای سازه‌ها و حریم‌ها تصمیم اشتباه بگیرند.

۲ .اهمیت و ضرورت پژوهش

پهنه‌بندی سیلاب ابزار مستقیم تصمیم‌گیری در شهرداری‌ها، سازمان‌های آب و سامانه‌های بیمه است. اگر این پهنه‌ها بر پایه فرض آبگذر باز تهیه شوند، مناطق پرخطر پنهان می‌مانند و مناطقی که در خطر نیستند بی‌جهت محدود می‌شوند. هزینه این خطا در شهرهای کوهپایه‌ای بالا است، چون شیب زیاد و سرعت جریان، خسارت را در زمان کوتاه افزایش می‌دهد.

ضرورت پژوهش از سه جهت است. نخست، انسداد آبگذرها در ایلام پدیده‌ای تکرارشونده است که در گزارش‌های رخداد و آثار سیلاب دیده می‌شود، اما در طرح‌های مطالعاتی به‌صورت کمّی وارد نشده است. دوم، نیاز به ابزاری است که تأثیر درصد انسداد را بر پهنه سیل نشان دهد تا بتوان برنامه پاک‌سازی و اولویت‌بندی سازه‌ها را بر پایه شواهد تنظیم کرد. سوم، بیشتر مطالعات انسداد یا آزمایشگاهی‌اند یا به یک سازه منفرد می‌پردازند. مطالعه‌ای که اثر انسداد را در سطح شهری و در شبکه‌ای از آبگذرها بسنجد، کمتر دیده شده است.

۳ .بیان مسئله

مسئله این پژوهش مشخص‌تر از «تأثیر انسداد بر سیلاب» است. پرسش دقیق این است که با افزایش درصد انسداد مؤثر دهانه پل‌ها و کالورت‌ها، پهنه سیل شهری و عمق آب در کوچه‌ها و معابر چه تغییری می‌کند، و آیا این تغییر خطی است یا از آستانه‌ای به بعد شتاب می‌گیرد. افزون بر این، مشخص نیست اثر انسداد ناشی از نخاله و زباله (که معمولاً به‌صورت شناور و گیرکرده در لبه بالادست آبگذر است) با اثر رسوب دانه‌درشت (که مقطع را از کف پر می‌کند) یکسان است یا نه. این دو مکانیسم ظاهراً متفاوت‌اند و در مدل‌سازی باید جداگانه تعریف شوند.

برای رفع ابهام، متغیرهای پژوهش به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

متغیر مستقل:

درصد انسداد مؤثر :(B) نسبت مساحت مقطع مسدودشده به مساحت مقطع طراحی آبگذر، در پنج سطح صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد. این مقدار در مدل از طریق کاهش سطح مقطع جریان در ورودی آبگذر اعمال می‌شود.

نوع انسداد: دو سطح، «نخاله و زباله شناور» (انسداد از بالا و نزدیک سطح آب) و «رسوب دانه‌درشت» (انسداد از کف). این متغیر به‌صورت کیفی و در دو سطح بررسی می‌شود.

متغیرهای وابسته:

مساحت پهنه سیل :(A) مساحت سطحی که عمق آب در آن از آستانه مشخص بیشتر است، بر حسب هکتار.

حداکثر عمق آب در معابر :(Hmax) بیشینه عمق در کوچه‌ها و خیابان‌های مجاور آبگذر، بر حسب متر.

تراز پس‌زدگی بالادست :(ΔZ) اختلاف تراز آب در بالادست آبگذر نسبت به وضعیت بدون انسداد، بر حسب متر.

حجم سرریز به معابر :(V) حجم آبی که از مسیر اصلی خارج و وارد معابر می‌شود، بر حسب مترمکعب.

متغیرهای مداخله‌گر:

زبری مانینگ :(n) ضریب زبری کف و دیواره‌های مسیل و معابر، که در مدل ثابت یا در بازه معین تغییر داده می‌شود.



دوره بازگشت بارش :(T) سطوح ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله. این متغیر در پژوهش به‌عنوان متغیر کنترل در نظر گرفته می‌شود و نه متغیر مستقل اصلی، چون هدف مقایسه اثر انسداد در شرایط بارش مختلف است.

وضوح مدل رقومی ارتفاع :(DEM) اندازه سلول شبکه و دقت برداشت ارتفاعی که بر پیش‌بینی مسیر معابر اثر دارد.

شرط مرزی پایین‌دست: نوع و موقعیت شرط مرزی خروجی، که اگر به آبگذر نزدیک باشد، پس‌زدگی را مصنوعی تغییر می‌دهد.

تراکم پوشش و شکل آبگذر: نوع سازه (پل یا کالورت) و تعداد دهانه‌ها، که مشخصات هندسی مقطع را تعیین می‌کند.

با این تعریف، مسئله پژوهش این است که آیا اثر انسداد بر پهنه سیل، پس از کنترل زبری، وضوح DEM و شرط مرزی، مستقل از نوع انسداد و دوره بازگشت است یا خیر. این پرسش پاسخی آزمون‌پذیر دارد و با داده‌های مدل قابل بررسی است.

۴ .اهداف پژوهش

۱ .واسنجی و صحت‌سنجی مدل دوبعدی HEC-RAS برای محدوده مسیل‌های شهری ایلام، با استفاده از ردپای سیلاب مشاهده‌شده.

۲ .شبیه‌سازی اثر درصد انسداد مؤثر دهانه پل‌ها و کالورت‌ها بر مساحت پهنه سیل و عمق آب در معابر مجاور.

۳ .تعیین رابطه میان نوع انسداد (نخاله شناور در برابر رسوب دانه‌درشت) و الگوی گسترش پهنه سیل.

۴ .شناسایی آستانه درصد انسداد که پس از آن افزایش پهنه سیل شتاب می‌گیرد.

۵ .سنجش سهم نسبی انسداد نسبت به زبری مانینگ و دوره بازگشت در تغییر پهنه سیل.

۶ .ارائه معیاری برای اولویت‌بندی پاک‌سازی و اصلاح آبگذرها بر پایه نتایج شبیه‌سازی.

۵ .سؤال‌های پژوهش

۱ .مدل دوبعدی HEC-RAS پس از واسنجی تا چه اندازه ردپای سیلاب مشاهده‌شده را در محدوده مطالعاتی بازتولید می‌کند؟

۲ .با افزایش درصد انسداد مؤثر دهانه‌ها، مساحت پهنه سیل و حداکثر عمق آب در معابر چه تغییری می‌کند؟



۳ .آیا انسداد ناشی از نخاله شناور و انسداد ناشی از رسوب دانه‌درشت، با درصد یکسان، پهنه سیل و الگوی پخش آب را به یک شکل تغییر می‌دهند؟

۴ .در کدام محدوده از درصد انسداد، رابطه میان انسداد و مساحت پهنه سیل از خطی به غیرخطی تغییر می‌کند؟

.اثر انسداد بر پهنه سیل در مقایسه با اثر زبری مانینگ و دوره بازگشت بارش چه اندازه است؟

۶ .کدام آبگذرها بیشترین حساسیت را به انسداد دارند و معیار هندسی یا هیدرولیکی آن‌ها چیست؟

۶ .فرضیه‌های پژوهش

H1.مدل دوبعدی پس از واسنجی، ردپای سیلاب مشاهده‌شده را با خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد در مساحت پهنه سیل بازتولید می‌کند و شاخص نش-ساتکلیف آن بیشتر از ۰/۷ است. (مرز پذیرش این فرضیه پیش از جمع‌آوری داده اعلام شده و پس از پیشینه‌یابی باید در صورت لزوم اصلاح و مستند شود.)

H2.رابطه میان درصد انسداد مؤثر و مساحت پهنه سیل غیرخطی است؛ یعنی افزایش انسداد از ۰ تا ۲۰ درصد، پهنه سیل را کمتر از افزایش همان اندازه از ۲۰ تا ۴۰ درصد گسترش می‌دهد.

H3.در درصدهای انسداد برابر، رسوب دانه‌درشت که مقطع را از کف پر می‌کند، تراز پس‌زدگی بالادست را بیشتر از نخاله شناور افزایش می‌دهد، اما حجم سرریز به معابر در دو نوع انسداد تفاوت معناداری ندارد.

H4.از آستانه‌ای به بعد (پیش‌بینی: حدود ۲۵ درصد انسداد)، افزایش انسداد باعث افزایش ناگهانی عمق آب در معابر مجاور می‌شود. این آستانه باید در شبیه‌سازی به‌دست آید و نه از پیش فرض شود.

H5.اثر انسداد بر مساحت پهنه سیل در دوره بازگشت ۵۰ ساله بیشتر از دوره ۱۰ ساله است، زیرا در دبی‌های بزرگ‌تر، مقطع باقی‌مانده آبگذر زودتر تحت فشار قرار می‌گیرد.

H6.اثر انسداد بر پهنه سیل بزرگ‌تر از اثر تغییر زبری مانینگ در بازه معقول (از ۰/۰۳۵ تا ۰/۰۵) است و سهم بیشتری از واریانس پهنه سیل را توضیح می‌دهد.

H7.کالورت‌ها نسبت به پل‌ها با درصد انسداد یکسان، حجم سرریز بیشتری به معابر منتقل می‌کنند، زیرا دهانه باریک‌تر و کم‌ارتفاع‌تری دارند و امکان عبور جریان از مقطع کاهش‌یافته را کمتر فراهم می‌کند.

H8.در شرایطی که شرط مرزی پایین‌دست به‌اندازه کافی دور از آبگذر تعریف شده باشد، اثر انسداد بر تراز پس‌زدگی بالادست مستقل از شرط مرزی است. اگر نتیجه برعکس باشد، شرط مرزی به‌عنوان متغیر مداخله‌گر قوی شناخته می‌شود و نتایج با احتیاط بیشتری تفسیر می‌شوند.

توضیح روش‌شناختی H1 :به هدف ۱ و سؤال ۱، H2و H4 به اهداف ۲ و ۴ و سؤال‌های ۲ و ۴، H3به هدف ۳ و سؤال ۳، H5و H6 به هدف ۵ و سؤال ۵، H7به سؤال ۶ و بخشی از هدف ۶ و H8 به کنترل متغیر مداخله‌گر مربوط‌اند. هر فرضیه با آزمون آماری یا مقایسه سناریوها پذیرفته یا رد می‌شود و تا اجرای مدل، هیچ‌یک تأیید شده تلقی نمی‌شود.

پیشینه پژوهش

۳-۱ .مفاهیم کلیدی

مفاهیم و متغیرهای این پژوهش همان‌هایی است که در بخش بیان مسئله تعریف شد: درصد و نوع انسداد (مستقل)، پهنه سیل، عمق در معابر، پس‌زدگی و حجم سرریز (وابسته)، و زبری مانینگ، دوره بازگشت، وضوح DEM و شرط مرزی (مداخله‌گر). عنوان «[متغیرها]» در درخواست پر نشده بود، بنابراین از همین مجموعه استفاده شد.

انسداد آبگذر در متون مهندسی رودخانه، کاهش سطح مقطع مؤثر جریان در ورودی یا داخل پل و کالورت بر اثر تجمع مواد شناور یا رسوب است .(Bradley et al., 2005) پس‌زدگی افزایش تراز آب بالادست است که از محدودیت ظرفیت عبور در مقطع کنترل ناشی می‌شود .(Chow, 1959) پهنه‌بندی سیلاب نیز تعیین گستره و عمق آبگرفتگی برای سناریوهای مشخص دبی است. مدل‌های دوبعدی معادلات آب‌های کم‌عمق را برای این کار حل می‌کنند.(Brunner, 2016)

۳-۲ .مبانی نظری

از نظر هیدرولیکی، آبگذر وقتی ظرفیتش کم می‌شود، مانند یک مقطع کنترل رفتار می‌کند. در جریان با کنترل ورودی، بار آبی بالادست به مساحت مقطع باز، شکل ورودی و دبی وابسته است .(Chow, 1959; Henderson, 1966) بنابراین کاهش مساحت مؤثر بر اثر انسداد، در یک دبی ثابت، تراز بالادست را به‌صورت غیرخطی بالا می‌برد. همین منطق

پایه فرضیه آستانه H2) و (H4 است. هنگامی که تراز از لبه کانال یا جاده بالاتر رود، جریان به معابر سرریز می‌کند و مسیر آن را توپوگرافی شهری تعیین می‌کند. این مرحله را فقط مدل دوبعدی می‌تواند نشان دهد.(Hunter et al., 2008)

نظریه دوم به احتمال و مکانیسم گیرافتادن مواد شناور مربوط است. تجمع مواد شناور به اندازه و طول قطعات نسبت به دهانه، سرعت جریان و وجود عناصر گیرانداز مانند نرده و پایه بستگی دارد .(Schmocker & Hager, 2011) رسوب دانه‌درشت از کف مقطع را پر می‌کند و رفتار هیدرولیکی متفاوتی دارد. این تفاوت مبنای تفکیک نوع انسداد در پژوهش حاضر است.

نظریه سوم عدم‌قطعیت مدل‌سازی است. نتایج مدل‌های سیل به زبری، دقت DEM و شرایط مرزی حساس‌اند .(Néelz & Pender, 2013) بنابراین باید اثر انسداد را پس از کنترل این عوامل ارزیابی کرد.

۳-۳ .پژوهش‌های تجربی خارجی

بخش عمده ادبیات خارجی درباره انسداد، آزمایشگاهی است و بر مواد چوبی تمرکز دارد . Schmockerو (2011) Hager با آزمایش‌های فلوم روی مدل عرشه پل، احتمال انسداد را به ویژگی‌های مواد شناور و جریان نزدیک‌شونده ربط دادند. آنان نشان دادند عناصر مانند نرده احتمال گیرافتادن را بالا می‌برند. یافته‌ی آنان برای تعیین وقوع انسداد مفید است، اما پهنه سیل شهری را بررسی نمی‌کند Pagliara .و (2011) Carnacina نیز در فلوم، اثر تجمع چوب بر آبشستگی پایه‌های پل را سنجیدند. تمرکز آن‌ها بر پایداری سازه است و پیامد آبگرفتگی بالادست در آن بررسی نشده است.

در سطح مدل‌سازی عددی، Mazzoranaو همکاران (۲۰۱۱) انتقال و ته‌نشست مواد چوبی را در رودخانه‌های آلپی شبیه‌سازی کردند و از آن برای شناسایی نقاط محتمل انسداد استفاده کردند. این کار نشان می‌دهد انسداد را می‌توان در چارچوب عددی وارد کرد. با این حال کاربرد آن در بستر کوهستانی طبیعی است و نه شبکه مسیل و معابر شهری. راهنمای FHWAبه نویسندگی Bradley و همکاران (۲۰۰۵) نیز روش‌های ارزیابی و کنترل مواد شناور را ارائه می‌دهد. این منبع عمدتاً مهندسی-طراحی است و پهنه‌بندی شهری را هدف قرار نمی‌دهد.

از سوی دیگر، مطالعات مقایسه مدل‌های سیل شهری نشان می‌دهند مدل دوبعدی در بازنمایی مسیر آب در معابر بر مدل یک‌بعدی برتری دارد، به شرط آنکه داده توپوگرافی

مناسب باشد (Hunter et al., 2008; Néelz & Pender, 2013). این مطالعات سازه‌های عبوری را معمولاً بدون انسداد فرض می‌کنند.

۳-۴ .پژوهش‌های داخلی

در جست‌وجوی انجام‌شده، پژوهشی داخلی که مستقیماً اثر انسداد پل و کالورت را بر پهنه سیل شهری با HEC-RAS دوبعدی بسنجد، تأیید نشد. این موضوع باید با جست‌وجوی نظام‌مند درSID ، نورمگز و مگیران بازبینی شود و نباید قطعی تلقی شود.

دانده و همکاران (۱۴۰۰) خطر وقوع سیل را در ایلام با روش آماری EBF مدل‌سازی کردند. آنان ۱۲۶ نقطه سیل‌گیر را به‌کار بردند و دقت مدل (AUC) را ۰/۹۱۴ گزارش کردند. این پژوهش نشان می‌دهد ایلام از نظر مکانی مستعد سیل است، اما سازه‌های هیدرولیکی و انسداد را در مقیاس محلی بررسی نمی‌کند. موسوی جهرمی و گودرزی‌زاده (۱۳۹۰) در نشریه علوم و مهندسی آبیاری (دوره ۳۴، شماره ۲، ص ۶۱–۷۰) مطالعه‌ای ارائه کرده‌اند که ارتباط دقیق آن با موضوع حاضر باید پیش از استناد نهایی بازبینی شود.

۳-۵ .نقد و جمع‌بندی

مطالعات پیشین سه الگو دارند. نخست، پژوهش‌های آزمایشگاهی احتمال و شکل انسداد را بررسی می‌کنند، اما اثر آن را بر پهنه سیل شهری نمی‌سنجند. دوم، مدل‌های دوبعدی شهری مسیر جریان را خوب بازنمایی می‌کنند، اما انسداد را وارد نمی‌کنند یا ثابت فرض می‌کنند. سوم، مطالعات داخلی بیشتر پهنه‌های مستعد سیل را به‌صورت آماری شناسایی کرده‌اند و اثر عوامل هیدرولیکی محلی در آن‌ها دیده نمی‌شود. افزون بر این، ادبیات بر مواد چوبی تمرکز دارد، در حالی که انسداد مسیل‌های شهری ایلام احتمالاً ترکیبی از نخاله، زباله و رسوب دانه‌درشت است. این گزاره یک فرض پژوهش است و نیازمند برداشت میدانی است.

۳-۶ .شکاف پژوهشی، ضرورت و نوآوری

شکاف پژوهشی دقیق چنین است: اثر درصد پیوسته و نوع انسداد آبگذرها بر پهنه سیل و عمق آب در معابر یک شهر کوهپایه‌ای، با کنترل زبری، دوره بازگشت و شرط مرزی، به‌صورت کمّی بررسی نشده است. ضرورت پژوهش حاضر از آنجاست که پهنه‌بندی بدون انسداد ممکن است خطر را کمتر از واقع نشان دهد. نوآوری آن در سه چیز است: تعریف انسداد به‌صورت سناریوهای پیوسته، تفکیک انسداد شناور از رسوبی، و سنجش سهم نسبی انسداد در برابر عوامل مداخله‌گر در مقیاس شهری ایلام.



روش‌شناسی

۴-۱ .نوع پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی است، چون نتیجه آن باید معیاری برای پاک‌سازی و اصلاح آبگذرها فراهم کند. از نظر ماهیت و روش، توصیفی-تحلیلی و از نوع شبیه‌سازی عددی است. بخش توصیفی وضعیت موجود آبگذرها و مسیل‌ها را ثبت می‌کند. بخش تحلیلی با اجرای سناریوهای کنترل‌شده، رابطه علّی میان انسداد و پهنه سیل را می‌سنجد. پژوهش ترکیبی در معنای متداول نیست، زیرا مصاحبه یا پرسشنامه ندارد. با وجود این، دو بخش داده دارد که باید جدا گزارش شوند. بخش میدانی-اسنادی (مشاهده و بررسی سوابق) داده‌های ورودی و واسنجی را می‌دهد. بخش عددی داده‌های خروجی مدل را تولید می‌کند. بخش کیفی در این پژوهش به مشاهده میدانی و ثبت نوع مواد مسدودکننده محدود است.

۴-۲ .جامعه آماری و نمونه‌گیری

جامعه آماری، مجموعه پل‌ها و کالورت‌های واقع بر مسیل‌های محدوده مرکزی شهر ایلام است. واحد تحلیل، هر آبگذر همراه با پهنه آبگرفتگی بالادست آن است. نمونه‌گیری تصادفی انجام نمی‌شود، چون جامعه کوچک و قابل شمارش است و هر آبگذر نقش هیدرولیکی متفاوتی در شبکه دارد. انتخاب هدفمند خواهد بود. آبگذرها بر پایه سه معیار برگزیده می‌شوند: وجود سابقه آبگرفتگی یا گزارش انسداد، تفاوت در نوع سازه (پل یا کالورت) و تفاوت در هندسه و شیب مسیر. این معیارها تنوع لازم برای مقایسه را می‌دهند. محدودیت این روش آن است که نتایج به کل شهرهای کوهپایه‌ای تعمیم‌پذیر نیست و فقط درباره الگوی هیدرولیکی قابل‌تعمیم است.

برای واسنجی، از میان رخدادهای سیلابی گذشته، رخدادی انتخاب می‌شود که ردپای سیل و گزارش‌های میدانی آن موجود باشد. رخداد دوم، در صورت وجود، برای صحت‌سنجی مستقل نگه داشته می‌شود تا واسنجی و ارزیابی روی یک داده انجام نشود.

۴-۳ .ابزار و منابع گردآوری داده

ابزار گردآوری شامل مشاهده میدانی، برداشت زمینی و بررسی اسناد است. پرسشنامه و مصاحبه استفاده نمی‌شود.

مشاهده و برداشت میدانی. هندسه هر آبگذر (ابعاد دهانه، ارتفاع، طول، جنس و شیب) با متر لیزری و دوربین نقشه‌برداری ثبت می‌شود. وضعیت انسداد موجود، نوع مواد تجمع‌یافته و میزان تقریبی پرشدگی با بازدید و عکس‌برداری مستند می‌شود. ردپای سیل، مانند خط گل و آثار روی دیوار، با موقعیت و تراز ثبت می‌شود.

اسناد. مدل رقومی ارتفاع با دقت بالا (ترجیحاً حاصل نقشه‌برداری هوایی یا لیدار) از سازمان‌های ذی‌ربط تهیه می‌شود. داده‌های بارش و منحنی شدت-مدت-فراوانی از ایستگاه‌های هواشناسی، نقشه کاربری و پوشش زمین از اسناد شهری و گزارش‌های رخداد سیل از مراجع مدیریت بحران دریافت می‌شود.

ابزار نرم‌افزاری. مدل دوبعدی HEC-RAS معادلات آب‌های کم‌عمق را روی شبکه محاسباتی حل می‌کند. هیدروگراف ورودی از مدل بارش-رواناب به دست می‌آید. آبگذرها در مدل با ساختار هیدرولیکی سازه‌ای تعریف می‌شوند و انسداد با کاهش مساحت مؤثر ورودی اعمال می‌شود.

۴-۴ .طراحی سناریوها

سناریوها بر پایه ترکیب سه عامل ساخته می‌شوند: درصد انسداد در چند سطح پیوسته از حالت بدون انسداد تا انسداد شدید، نوع انسداد (شناور یا رسوبی) و دوره بازگشت بارش. در انسداد شناور، مقطع از بالا کاهش می‌یابد. در انسداد رسوبی، کف آبگذر بالا می‌آید. هر ترکیب جداگانه اجرا می‌شود و تغییر تنها در عامل مورد نظر اعمال می‌شود تا بتوان اثر را به آن نسبت داد. برای متغیرهای مداخله‌گر، زبری مانینگ در بازه معقول، و شرط مرزی پایین‌دست در دو فاصله مختلف تغییر داده می‌شود. وضوح شبکه نیز در آزمون جداگانه مقایسه می‌شود.

۵- .روش تحلیل داده‌ها

تحلیل در چهار مرحله انجام می‌شود. نخست، ارزیابی دقت مدل با مقایسه پهنه شبیه‌سازی‌شده و ردپای مشاهده‌شده، با شاخص‌های انطباق مکانی و شاخص نش-ساتکلیف برای ترازها. دوم، مقایسه سناریوها برای کمّی‌کردن تغییر مساحت پهنه، بیشینه عمق، تراز پس‌زدگی و حجم سرریز نسبت به حالت مبنا. سوم، بررسی غیرخطی بودن رابطه انسداد و پاسخ با رگرسیون و تحلیل نقطه شکست. چهارم، تحلیل حساسیت برای سنجش سهم نسبی انسداد در برابر زبری و دوره بازگشت، با تحلیل واریانس و رگرسیون چندمتغیره. مقایسه کالورت و پل با آزمون مقایسه گروهی انجام می‌شود.

۶-۴ .روایی و پایایی

در پژوهش شبیه‌سازی، روایی به معنی صحت مدل در بازنمایی واقعیت است. روایی صوری با بازبینی ساختار مدل توسط کارشناس هیدرولیک و بررسی سازگاری با ادبیات تأمین می‌شود. روایی ملاکی با واسنجی و صحت‌سنجی مستقل روی دو رخداد حاصل می‌شود. پایایی با تکرارپذیری ارزیابی می‌شود. تمام تنظیمات مدل، نسخه نرم‌افزار و داده‌های ورودی ثبت می‌شوند تا پژوهشگر دیگر بتواند همان نتیجه را بازتولید کند. همچنین آزمون استقلال از شبکه نشان می‌دهد که نتایج به

اندازه سلول وابسته نیستند. روایی ابزار میدانی با کالیبراسیون دستگاه‌ها و ثبت مستقل توسط دو مشاهده‌گر بررسی می‌شود.

نتایج

هشدار روش‌شناختی: مدل هنوز اجرا نشده است. بنابراین متن زیر الگوی نتایجی است که بر پایه مبانی هیدرولیکی انتظار می‌رود و یافته واقعی نیست. هر جمله باید پس از اجرای مدل با خروجی تطبیق داده شود و در صورت مغایرت اصلاح گردد. عددها عمداً حذف شده‌اند و باید از خروجی مدل افزوده شوند.

۵-۱ .صحت مدل

نخستین یافته مورد انتظار، میزان انطباق مدل با ردپای مشاهده‌شده است. اگر انطباق مکانی پهنه و شاخص ترازها در حد پذیرفتنی باشد، فرضیه نخست پشتیبانی می‌شود و تحلیل‌های بعدی اعتبار می‌یابند. در غیر این صورت، منشأ خطا باید پیش از تفسیر شناسایی شود. دلایل محتمل عبارت‌اند از دقت ناکافیDEM ، نبود جزئیات ساختمان‌ها در مدل، بی‌دقتی در ثبت ردپا یا برآورد نادرست زبری. در این وضعیت، مقایسه سناریوها فقط جنبه نسبی خواهد داشت.

۵-۲ .اثر درصد انسداد

بر اساس نظریه کنترل ورودی، با افزایش انسداد انتظار می‌رود تراز پس‌زدگی بالادست افزایش یابد. اما رابطه احتمالاً خطی نیست. در انسدادهای اندک، ظرفیت مازاد طراحی بخش بزرگی از کاهش مقطع را جذب می‌کند و تغییر پهنه کوچک می‌ماند. پس از آستانه‌ای که ظرفیت مازاد تمام می‌شود، آب به لبه‌های کانال می‌رسد و بخشی از دبی وارد معابر می‌شود. در این نقطه، افزایش اندک انسداد، پهنه سیل را بسیار بیشتر از قبل گسترش می‌دهد. علت علّی این شتاب، گذر از وضعیت جریان محدود در مجرا به وضعیت سرریز سطحی است، که در آن مساحت درگیر با توپوگرافی معابر تعیین می‌شود و نه با هندسه آبگذر. اگر مدل چنین شکستی را نشان ندهد، دو توضیح ممکن است: ظرفیت مازاد آبگذرها اساساً کم است، یا معابر مجاور گودتر از حد انتظارند و سرریز از ابتدا آغاز شده است.

۵-۳ .نوع انسداد

انتظار می‌رود رسوب دانه‌درشت، که مقطع را از کف پر می‌کند، تراز پس‌زدگی را بیشتر از نخاله شناور بالا ببرد. دلیل این است که آب از بخش بالایی مقطع هنوز می‌تواند عبور کند اما سطح و عمق مؤثر کاهش می‌یابد. نخاله شناور بیشتر مقطع بالایی را می‌بندد و در دبی‌های کمتر، جریان زیرین ادامه دارد. با این حال، حجم سرریز به معابر ممکن است در دو نوع مشابه باشد، چون سرریز

به مجموع ظرفیت باقی‌مانده بستگی دارد و نه به موقعیت انسداد. اگر مدل تفاوت آشکاری در حجم سرریز نشان دهد، باید بررسی شود که آیا این تفاوت از نحوه اعمال انسداد در نرم‌افزار ناشی شده است یا اثر فیزیکی واقعی دارد.

۵-۴ .عوامل مداخله‌گر

دوره بازگشت احتمالاً اثر انسداد را تشدید می‌کند. در دبی بزرگ‌تر، مقطع باقی‌مانده زودتر از ظرفیتش عبور می‌کند، پس آستانه سرریز در انسداد کمتری رخ می‌دهد. زبری مانینگ بر عمق و سرعت در مسیل و معابر اثر دارد. انتظار می‌رود تغییر آن در بازه معقول اثری کوچک‌تر از انسداد شدید داشته باشد، اما در انسداد اندک، اثر زبری می‌تواند قابل مقایسه با انسداد باشد. این الگو سهم نسبی را شرطی می‌کند و نه ثابت. شرط مرزی پایین‌دست اگر نزدیک آبگذر باشد، پس‌زدگی را مصنوعی تغییر می‌دهد. بنابراین مقایسه دو فاصله مرزی تعیین می‌کند که آیا اثر انسداد مستقل از مرز است. اگر وابسته باشد، نتایج با احتیاط تفسیر می‌شوند. وضوح DEM نیز مسیر معابر را تغییر می‌دهد، زیرا حذف جزئیات مانند جدول و دیوار ممکن است جریان را به کوچه‌های دیگر بکشاند.

۵-۵ .تفاوت کالورت و پل

کالورت‌ها به‌علت دهانه کوچک‌تر و ارتفاع کمتر، انتظار می‌رود با انسداد مشابه حجم سرریز بیشتری ایجاد کنند، زیرا مقطع باقی‌مانده آن‌ها سریع‌تر پر می‌شود. این تفاوت باید پس از کنترل اندازه دهانه و شیب بررسی شود. اگر کالورت‌های دارای دهانه بزرگ‌تر رفتار پل را نشان دهند، علت اصلی اندازه نسبی دهانه است و نه نوع سازه.

۵-۶ .جمع‌بندی تحلیلی

اگر الگوهای بالا تأیید شوند، می‌توان نتیجه گرفت که خطر ناشی از انسداد عمدتاً از گذر از آستانه ظرفیت مازاد ناشی می‌شود، و برای مدیریت، مهم‌ترین اقدام نگه‌داشتن آبگذرها زیر آن آستانه است. اگر الگو تأیید نشود، باید بررسی شود که آیا ضعف از داده، مدل یا فرض نظری است. تأیید یا رد هر فرضیه تنها پس از اجرای مدل و آزمون آماری امکان‌پذیر است.

بحث و تحلیل

یادآوری: مدل هنوز اجرا نشده است. این بخش چارچوب تفسیر مشروط است و هیچ فرضیه‌ای در آن تأیید یا رد نمی‌شود. هر گزاره باید پس از دریافت خروجی خام مدل (ترازها، پهنه‌ها، حجم‌ها) با داده‌ها تطبیق داده شود.

۶-۱ .تفسیر صحت مدل) فرضیهH1 ، سؤال ۱

اگر انطباق پهنه شبیه‌سازی‌شده با ردپای مشاهده‌شده در حد پذیرفتنی باشد، فرضیه H1 پشتیبانی می‌شود. این انطباق در مطالعات مقایسه‌ای مدل‌های سیل شهری نیز گزارش شده است و ریشه آن در توانایی حل‌گرهای دوبعدی برای بازنمایی مسیر آب در معابر است (Hunter et al., 2008; Néelz & Pender, 2013). اما انطباق به‌تنهایی دلیل درستی همه اجزای مدل نیست. ممکن است خطای زبری با خطای DEM یکدیگر را خنثی کنند و انطباق ظاهری ایجاد شود. به همین دلیل، تفسیر باید از داده خام ترازهای ردپا و مقایسه ترازها در نقاط جداگانه آغاز شود و فقط به شاخص کلی بسنده نشود. اگر خطا در نقاط نزدیک آبگذرها متمرکز باشد، احتمالاً نحوه بازنمایی سازه و نه زبری علت آن است. در این حالت، نتایج مربوط به انسداد را باید با احتیاط بیشتری خواند.

۶-۲ .رابطه انسداد و پهنه سیل (H2 وH4) ، سؤال‌های ۲ و ۴

مبنای نظری انتظار غیرخطی بودن، هیدرولیک کنترل ورودی است. در این رژیم، بار آبی بالادست با مساحت مقطع باز نسبت معکوس دارد و کاهش مقطع، تراز را با شتاب بالا می‌برد (Chow, 1959; Henderson, 1966). اگر داده‌های مدل شکست شیب را نشان دهند، توضیح علّی آن گذر از ظرفیت مازاد طراحی است. پیش از آن، آب درون مجرا باقی می‌ماند و پس از آن به معابر می‌رسد. در این صورت، آستانه تجربی به‌دست‌آمده باید به ظرفیت مازاد هر آبگذر ربط داده شود و نه صرفاً به یک درصد ثابت. چون ظرفیت مازاد در آبگذرهای مختلف متفاوت است، آستانه یگانه برای همه محتمل نیست. به همین دلیل پیش‌بینی حدود ۲۵ درصد در H4 فقط یک ملاک ابتدایی بود و نباید همچون قاعده ثابت به کار رود. اگر رابطه خطی باقی بماند، سه تفسیر رقیب وجود دارد: ظرفیت مازاد ناچیز است، معابر از ابتدا گود هستند و سرریز زود آغاز می‌شود، یا ضعف در بازنمایی ورودی آبگذر است. تفکیک این سه با بررسی تراز لبه کانال نسبت به تراز آب در هر سناریو ممکن است.

۶-۳ .نوع انسداد(H3) ، سؤال ۳

اگر پس‌زدگی در انسداد رسوبی بیشتر از شناور باشد، منطق هیدرولیکی آن کاهش عمق مؤثر و مساحت مقطع در هر دو حالت است، با این تفاوت که رسوب تراز کف را بالا می‌برد و جریان عبوری را به قسمت بالایی محدود می‌کند. در مقابل، تجمع شناور بیشتر به احتمال گیرافتادن مواد بر نرده و لبه ورودی وابسته است (Schmocker & Hager, 2011). بنابراین نتایج مدل فقط وقتی با آن مطالعه آزمایشگاهی مقایسه‌پذیرند که فرض شود انسداد شناور در مدل، مقطع را به‌صورت ثابت کاهش می‌دهد. در واقعیت، این تجمع پویا است و با افزایش دبی رشد می‌کند. بنابراین اگر مدل برای انسداد شناور نتیجه ملایم‌تری نسبت به مشاهدات میدانی بدهد، دلیل می‌تواند ایستا بودن

فرض باشد. برابری حجم سرریز در دو نوع انسداد نیز اگر دیده شود، به معنای آن است که پس از اشباع مقطع، پیکربندی انسداد اهمیت خود را از دست می‌دهد و ظرفیت باقی‌مانده اهمیت می‌یابد.

۶-۴ .سهم نسبی انسداد و عوامل مداخله‌گر(H5) ، H6وH8 ، سؤال ۵

انتظار می‌رود تشدید اثر انسداد در دوره بازگشت بالاتر، به نزدیک شدن دبی به ظرفیت مقطع باقی‌مانده مربوط باشد. اگر داده‌ها این الگو را نشان ندهند، ممکن است ظرفیت آبگذر در دوره‌های کوتاه نیز پر شده باشد و تفاوت دوره‌ها کم باشد. درباره زبری، دانش پیشین نشان می‌دهد زبری در شرایط جریان محدود بر عمق اثر چشمگیر دارد، اما در شرایط سرریز، مسیرهای سطحی سهم بیشتری می‌یابند. بنابراین سهم نسبی انسداد در برابر زبری ثابت نیست و باید بر حسب سطح انسداد گزارش شود. تحلیل واریانس سهم هر عامل را اندازه می‌گیرد، اما وجود اثر متقابل بین انسداد و دوره بازگشت می‌تواند تفسیر سهم‌های جداگانه را گمراه کند و لازم است صریحاً بررسی شود. شرط مرزی پایین‌دست نیز، اگر نزدیک آبگذر باشد، پس‌زدگی را می‌افزاید. در صورتی که اثر انسداد با تغییر فاصله مرز دگرگون شود، بخشی از اثر مشاهده‌شده مصنوعی است و H8 به‌عنوان هشدار روش‌شناختی تلقی می‌شود. حساسیت به وضوح DEM نیز می‌تواند مسیر معابر و در نتیجه الگوی پخش را تغییر دهد.(Néelz & Pender, 2013)

۶-۵ .تفاوت کالورت و پل(H7) ، سؤال ۶

اگر کالورت‌ها حجم سرریز بیشتری ایجاد کنند، تفسیر نخست دهانه کوچک‌تر است، اما این ممکن است ناشی از اندازه دهانه باشد و نه نوع سازه. برای جدا کردن این دو، مقایسه باید در محدوده‌ای از آبگذرها انجام شود که دهانه‌ای هم‌اندازه دارند. اگر چنین مقایسه‌ای ممکن نباشد، باید به‌صراحت گزارش شود که نوع سازه و اندازه هم‌خطی دارند و تفکیک اثر آنها نامقدور است.

۶-۶ .پیوند با پیشینه و شکاف

نتایج مدل در صورت تأیید، شکاف میان مطالعات آزمایشگاهی احتمال انسداد (Schmocker & Hager, 2011)و پهنه‌بندی شهری بدون انسداد (Hunter et al., 2008) را پر می‌کند. اما نتایج نمی‌توانند احتمال وقوع انسداد را نشان دهند. مدل فقط پیامد را برای سناریوی فرضی می‌سنجد و نه تکرارپذیری آن را. این تفاوت باید در تفسیر خطر رعایت شود.

.نتیجه‌گیری

یادآوری: این بخش ساختار پاسخ به اهداف است. محتوای عددی و تأیید یا رد فرضیه‌ها پس از اجرای مدل افزوده می‌شود.

۷-۱ .پاسخ به اهداف

هدف نخست (واسنجی و صحت‌سنجی): پاسخ به میزان انطباق مدل با ردپای دو رخداد بستگی دارد. اگر انطباق پذیرفتنی باشد، مدل ابزار قابل اتکا برای مقایسه سناریوهاست. اگر نباشد، نتایج فقط برای رتبه‌بندی نسبی کاربرد دارند.

هدف دوم (اثر درصد انسداد): خروجی این هدف منحنی پاسخ پهنه سیل و عمق معابر به انسداد برای هر آبگذر است. مهم‌ترین دستاورد، نشان دادن این است که کدام آبگذرها هنوز در محدوده‌ی ظرفیت مازاد کار می‌کنند.

هدف سوم (نوع انسداد): نتیجه این هدف مشخص می‌کند آیا برنامه پاک‌سازی باید برای نخاله شناور و رسوب دانه‌درشت جداگانه طراحی شود یا خیر.

هدف چهارم (آستانه): دستاورد، آستانه‌ای مختص هر آبگذر است که با ظرفیت مازاد آن تعریف می‌شود و نه یک عدد کلی.

هدف پنجم (سهم نسبی): نتیجه نشان می‌دهد در کدام سطح انسداد، کنترل انسداد از بازنگری زبری یا طرح بارش مؤثرتر است.

هدف ششم (معیار اولویت‌بندی): خروجی نهایی فهرست رتبه‌بندی‌شده آبگذرها بر پایه حساسیت به انسداد است.

۷-۲ .محدودیت‌ها

نخست، انسداد در مدل ایستا است، در حالی که در واقعیت با دبی رشد می‌کند و ممکن است در اوج سیل رها شود. دوم، مدل احتمال وقوع انسداد را نمی‌دهد و فقط پیامد را می‌سنجد. سوم، تعداد رخدادهای قابل استفاده برای واسنجی محدود است و صحت‌سنجی مستقل ممکن است ناقص بماند. چهارم، ردپاهای سیل گاهی با خطای ثبت همراه‌اند و نمی‌توان انطباق را فراتر از دقت آنها ارزیابی کرد. پنجم، DEMجزئیات شهری مانند دیوار و جدول را ممکن است کامل نشان ندهد. ششم، جامعه هدفمند انتخاب شده است و نتایج به شهرهای دیگر تعمیم‌پذیر نیستند. هفتم، منابع خارجی موجود عمدتاً درباره مواد چوبی‌اند و برای نخاله شهری تطبیق مستقیم ندارند.

۷-۳ .پیشنهادهای پژوهشی

۱ .مدل‌سازی پویا: انسداد به‌صورت تابعی از زمان و دبی تعریف شود، تا تجمع تدریجی و رهاشدن ناگهانی بازنمایی شود.

۲ .ترکیب با احتمال: با برداشت میدانی فراوانی انسداد در چند فصل بارشی، توزیع احتمال درصد انسداد برآورد و خطر مورد انتظار محاسبه شود.



۳ .مدل فیزیکی تکمیلی: آزمایش فلوم برای نخاله شهری (و نه فقط چوب) انجام شود تا ضریب افت ورودی در شرایط انسداد واسنجی گردد.

۴ .بازبینی منابع داخلی: جست‌وجوی نظام‌مند درSID ، نورمگز و مگیران انجام شود، چون پژوهش مستقیم داخلی تأیید نشد.

۵ .تعمیم به شهرهای مشابه: همین طرح در شهرهای کوهپایه‌ای دیگر تکرار شود تا آستانه‌ها با ظرفیت مازاد و شیب مقایسه شوند.

۴-۷ .کاربردهای عملی

۱ .اولویت‌بندی پاک‌سازی: آبگذرهایی که ظرفیت مازاد کمی دارند و بالادستشان معابر گود است، پیش از فصل بارش پاک‌سازی شوند. معیار تصمیم، رتبه حساسیت حاصل از مدل است.

۲ .پایش مبتنی بر آستانه: برای هر آبگذر پرخطر، شاخص بصری ساده (مانند تراز علامت‌گذاری‌شده بر دیواره ورودی) تعریف شود تا گذر از آستانه انسداد قابل تشخیص باشد.

۳ .اصلاح ورودی: نصب تله‌ی نخاله در بالادست آبگذرهای شناور–حساس و کف‌کنی دوره‌ای در آبگذرهای رسوب‌حساس بررسی شود. انتخاب میان این دو بر اساس نتیجه هدف سوم باشد.

۴ .اصلاح پهنه‌بندی رسمی: در نقشه‌های پهنه سیل، سناریوی دارای انسداد برای آبگذرهای پرخطر افزوده شود، تا محدوده‌های ساخت‌وساز بدون فرض ایده‌آل تعیین شوند.

۵. کنترل منبع: با توجه به نقش نخاله ساختمانی، نظارت بر محل دپوی نخاله در حریم مسیل‌ها مورد توجه قرار گیرد. اثربخشی این اقدام را باید برداشت میدانی محل منشأ مواد تأیید کند.

منابع

Bradley, J. B., Richards, D. L., & Bahner, C. D. (2005). Debris control structures: Evaluation and countermeasures (Hydraulic Engineering Circular No. 9, 3rd ed.). Federal Highway Administration.

Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS river analysis system: 2D modeling user’s manual. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

Hunter, N. M., Bates, P. D., Neelz, S., Pender, G., Villanueva, I., Wright, N. G., … Mason, D. C. (2008). Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Water Management, 161(1), 13–30.



Néelz, S., & Pender, G. (2013). Benchmarking the latest generation of 2D hydraulic modelling packages (Report SC120002). Environment Agency, UK.

Schmocker, L., & Hager, W. H. (2011). Probability of drift blockage at river bridges. Journal of Hydraulic Engineering, 137(4), 470–479.