

## بررسی عوامل کنترل‌کننده پاسخ رودخانه‌های کوهستانی به واقعه سیلاب شدید (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد ایلام)

زهرا خان‌بابایی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران  
ابراهیم مقیمی\* - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران  
مهران مقصودی - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران  
مجتبی یمانی - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران  
سید کاظم علوی‌پناه - استاد گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۶/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۱۰

### چکیده

سیلاب‌های شدید یکی از فاجعه‌بارترین حوادث طبیعی به‌شمار می‌روند. این سیلاب‌ها می‌توانند به تغییرات مورفولوژیک قابل‌توجهی در چشم‌انداز منطقه منجر شوند. در این مقاله به پاسخ ژئومورفولوژیک رودخانه‌های کوهستانی ایلام به سیلاب شدید سال ۱۳۹۴، با ارائه روابط بین تغییرات مورفولوژیک و عوامل کنترل‌کننده آن در سرشاخه‌های رودخانه کنجانچم (بالادست سد ایلام)، پرداخته شده است. یک رویکرد یک‌پارچه از جمله تجزیه و تحلیل تغییرات عرض کانال، برآورد دبی اوج، و شاخص‌های هیدرولیک در بازه‌های مورد مطالعه، تعیین درجه رسوب‌دهی در بازه‌ها، و بررسی نقش عوامل انسانی در تشدید پاسخ سیلاب در مطالعه این واقعه استفاده شد. روابط بین میزان گسترش کانال و عوامل کنترل‌کننده در مقیاس بازه با استفاده از مدل‌های رگرسیون چندمتغیره بررسی شد. نتایج بیانگر این بود که در این مدل‌ها نسبت عرض رابطه‌ای نسبتاً قوی با پایداری جانبی، عوارض انسانی، درجه رسوب‌دهی، و توان واحد جریان محاسبه‌شده براساس عرض کانال قبل از سیلاب دارد و ضرایب تبیین چندمتغیره ( $R^2$ ) در محدوده ۰/۷۳ تا ۰/۸ قرار گرفت. نتایج نشان داد که متغیرهای هیدرولیک به‌تنهایی قابلیت توضیح پاسخ کانال به سیلاب‌های شدید را نداشته و گنجاندن فاکتورهای دیگری از قبیل پایداری جانبی، درجه رسوب‌دهی، و عوامل انسانی برای افزایش قابلیت توضیح مدل‌های رگرسیون موردنیاز است.

واژگان کلیدی: پایداری جانبی، رگرسیون چندمتغیره، سد ایلام، سیلاب شدید، گسترش کانال.

### مقدمه

سیلاب‌های شدید یکی از فاجعه‌بارترین حوادث طبیعی محسوب می‌شوند و می‌توانند به تغییرات مورفولوژیک قابل‌توجهی ناشی از فرسایش و فرایند رسوب‌گذاری در چشم‌انداز منطقه منجر شوند (تونگی و همکاران، ۲۰۱۷). عدم درک عملکرد طبیعی سیستم‌های آبرفتی می‌تواند نتایج تأسفبار و حتی زیان‌بخشی به‌دنبال داشته باشد. گرچه به‌نظر می‌رسد یک‌سری روابط کلی بین پارامترهای شکل رودخانه، دبی آب، و رسوب از یک طرف و رفتار رودخانه وجود داشته باشد، همیشه عنصر عدم اطمینان به واکنش رودخانه در برابر یک واکنش معین دیده می‌شود. از این‌رو، می‌توان گفت که مطالعه سیستم‌های رودخانه‌ای برای درک و فهم آستانه‌های پاسخ‌گویی، عناصر بازخوردی، و سایر پیچیدگی‌ها هسته اصلی ژئومورفولوژی سیلاب را تشکیل می‌دهد (بیکر و همکاران، ۱۹۹۸). به‌دنبال وقوع بارندگی‌های شدید و ناگهانی، سیلاب بزرگ و ویرانگری در هفتم آبان سال ۱۳۹۴ در استان ایلام به‌وقوع پیوست که طی شواهد و قرائن موجود در چند دهه اخیر بی‌سابقه بوده است. حداکثر دبی لحظه‌ای ثبت‌شده

در ایستگاه گل گل ۲۳۰، در ایستگاه چاوز ۱۳۹، و در ایستگاه اما ۵۸ مترمکعب بر ثانیه بود. سیلاب مزبور باعث تغییرات عمده‌ای در مورفولوژی رودخانه‌های اصلی ایلام شد و با گسترش عرضی قابل توجهی همراه بود. میزان گسترش کانال در مقاطع مختلف از رودخانه‌های مورد مطالعه متغیر بود که به بررسی عوامل تأثیرگذار و کنترل کننده، که باعث تنوع رفتار رودخانه شده، منجر گردید. از آنجا که مطالعات بسیار اندکی در این زمینه ارائه شده، این پژوهش با هدف بررسی عوامل کنترل کننده پاسخ ژئومورفیک رودخانه‌های کوهستانی در بالادست سد ایلام به واقعه سیلاب شدید انجام گرفت.

تأثیر ژئومورفولوژی سیلاب‌های بزرگ از دیرباز مورد مطالعه و بحث بوده‌اند (ولمن و میلر، ۱۹۶۰؛ کاستا و اوکانر، ۱۹۹۵؛ فیلیپس، ۲۰۰۲؛ کال و هایر، ۲۰۰۴؛ تامپسون و کروک، ۲۰۱۳؛ مگیلیگان و همکاران، ۲۰۱۵). مطالعات متعددی به گسترش مفهوم دبی مؤثر، که در اصل ولمن و میلر (۱۹۶۰) آن را ارائه کردند، کمک کرده‌اند؛ که اشاره به این موضوع دارد که اولاً مناسب‌تر است طیف وسیعی از دبی را به جای یک دبی شکل‌دهنده در نظر بگیریم (سوریان و همکاران، ۲۰۰۹) و دیگر اینکه سیلاب‌های بزرگ ممکن است نقش مهمی در سیستم رودخانه‌ای خاص مانند کانال‌های شیب‌دار (جانسون و وارپورتان، ۲۰۰۲؛ لنزی و همکاران، ۲۰۰۶) در جریان‌های زودگذر مناطق خشک و نیمه‌خشک (هوک و مانت، ۲۰۰۰) و در کانال‌های سنگ بستر (جانسن، ۲۰۰۶) بازی کنند. یکی دیگر از سؤالات مهم پژوهشی مربوط به عوامل کنترل کننده واکنش کانال به واقعه سیلاب شدید است. در اغلب پژوهش‌ها عمدتاً بر متغیرهای هیدرولیک تمرکز شده است (مانند توان واحد جریان<sup>۱</sup> و جریان با مدت زمان بیشتر از آستانه بحرانی توسط سندرلی و وول، ۲۰۰۳؛ کال، ۲۰۰۷؛ کرایچ و همکاران، ۲۰۱۱؛ مگیلیگان و همکاران، ۲۰۱۵). اما پیشنهاد کاستا و اوکانر (۱۹۹۵) این بود که برای درک و پیش‌بینی کانال و پاسخ دشت سیلابی به سیل‌های بزرگ باید عوامل دیگری را نیز در نظر گرفت. برخی تأکید دارند که نیروهای هیدرولیک ممکن است برای توضیح آثار ژئومورفولوژیکی کافی نباشد (مثل هریتیج و همکاران، ۲۰۰۴؛ ناردی و رینالدی، ۲۰۱۵). در نتیجه، تلاش شده است عوامل دیگر هم در نظر گرفته شود. مثلاً، لانگامر (۲۰۱۰) مداخلات و ساختارهای انسانی، دین و اشمیت (۲۰۱۳) ذخیره بار بستر و شکل پلان کانال قبل سیلاب، و تامپسون و کروک (۲۰۱۳) پایداری جانبی<sup>۲</sup> را در نظر گرفته‌اند. این پژوهش مربوط به سیلاب شدید سال ۱۳۹۴ ایلام است که در سه زیرحوضه (بالادست سد ایلام) با مقایسه تصاویر ماهواره‌ای گرفته شده قبل و بعد از سیلاب مطالعه شد. فرضیه پژوهش این بود که توضیح آثار ژئومورفولوژیک سیلاب‌های شدید نیازمند مدل‌هایی است که، علاوه بر عوامل مرتبط هیدرولیک (مانند توان سطح مقطعی جریان<sup>۳</sup> یا توان واحد جریان)، شامل متغیرهای دیگری (مثل پایداری جانبی، عوامل انسانی، و درجه رسوب‌دهی) نیز باشد. هدف اصلی از این مقاله بررسی رابطه بین گسترش کانال و طیف وسیعی از عوامل کنترل کننده است. از اهداف دیگر این پژوهش پاسخ به این سؤال است که کدام عرض کانال (عرض قبل یا عرض بعد از سیلاب) باید برای محاسبه توان واحد جریان به منظور توضیح بهتر پاسخ کانال در نظر گرفته شود؟ به همین دلیل، از رویکردی یک‌پارچه برای مطالعه این واقعه سیلاب استفاده شد. علاوه بر تجزیه و تحلیل تغییرات مورفولوژیکی، رویکرد شامل اندازه‌گیری‌های میدانی به همراه برآورد دبی اوج و تعیین درجه رسوب‌دهی در بازه‌های مورد مطالعه و اطلاعات مربوط به دیگر جنبه‌های اساسی از این رویداد بود.

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سد ایلام در موقعیت جغرافیایی بین  $46^{\circ}16'36''$  تا  $46^{\circ}38'32''$  طول شرقی و  $33^{\circ}23'27''$  تا

1. unit stream power

2. lateral confinement

3. cross-sectional stream power

33°38'54" عرض شمالی واقع در شمال شرق شهرستان ایلام با مساحت ۴۷۵ کیلومتر مربع قرار دارد. این حوضه آبخیز، بین حوضه‌های ایلام، شیروان چرداول، دره‌شهر، و چنگوله واقع شده است. سه رودخانه مهم در این حوضه گل‌گل، چاویز، و اما است که در بالادست سد ایلام واقع شده‌اند و در این مطالعه بررسی شدند (شکل ۱). طولانی‌ترین رودخانه مورد مطالعه رودخانه گل‌گل با طول ۳۵ km است. اقلیم منطقه معتدل نیمه‌مرطوب است و میانگین بارش منطقه ۵۵۷ میلی‌متر است. سنگ‌های موجود در سطح حوضه مورد بررسی (اغلب آهکی و مارنی) متعلق به دوران‌های دوم و سوم زمین‌شناسی است و رسوبات کواترنری نیز در مناطقی مشاهده شد.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش در چند مرحله انجام گرفته است:

**استفاده از اسناد و منابع کتابخانه‌ای:** این بخش شامل همه منابع نوشتاری از قبیل کتاب‌ها، مقالات فارسی و

انگلیسی، و پایان‌نامه‌ها می‌شود که طی مراحل مختلف تحقیق استفاده شده است.

**استفاده از داده‌های تصویری:** در این مرحله از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰،

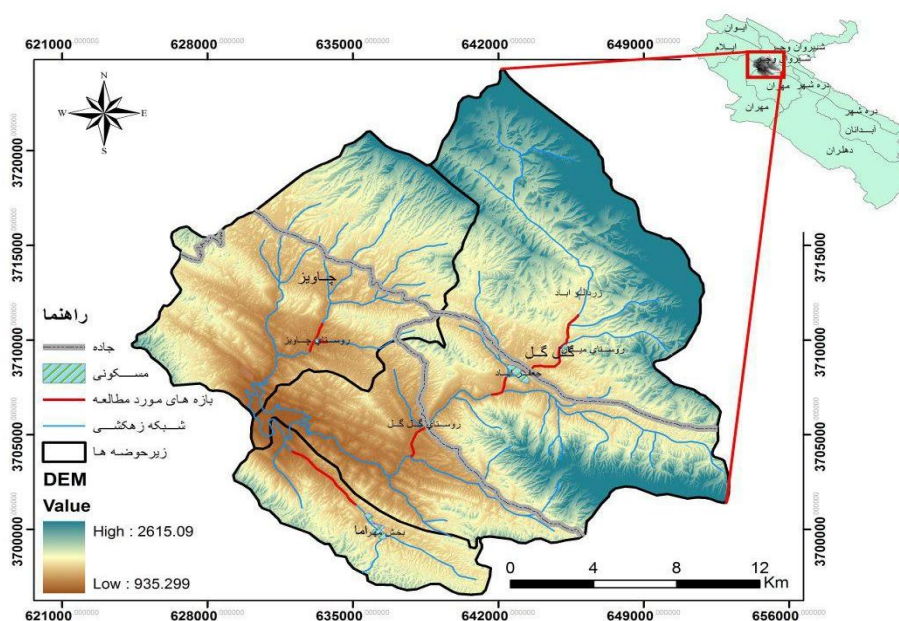
DEM ۱۰ متر منطقه، تصاویر ماهواره‌ای IRS با قدرت تفکیک مکانی ۲٫۵ متر و تصاویر Google Earth قبل و بعد از سیلاب و نرم‌افزارهای Arc hydro، ENVI، Arc GIS، و SPSS استفاده شد.

**استفاده از داده‌های آماری:** داده‌هایی از جمله شرایط محیطی منطقه، آمار و ارقام مربوط به ایستگاه‌های

هیدرومتری و باران‌سنجی از آب منطقه‌ای استان ایلام تهیه و برای محاسبه ارتفاع رواناب و برآورد دبی پیک در هر بازه استفاده شد.

**گردآوری داده‌های میدانی:** روش کار در این مرحله شامل مشاهده مستقیم رودخانه‌ها، تعیین عرض آن‌ها و

دشت‌های آبرفتی بعد از سیلاب، تعیین وضعیت پایداری جانبی در همه بازه‌ها، و ثبت عوارض انسانی موجود در طول بازه‌های مورد مطالعه است.



شکل ۱. موقعیت منطقه و بازه‌های مورد مطالعه

رویکردی یک‌پارچه به منظور بررسی اثرهای ژئومورفیک سیلاب آبان‌ماه ۱۳۹۴ در حوضه آبریز سد ایلام اتخاذ شد. تجزیه و تحلیل میزان بارش، دبی اوج، و تغییرات کانال توسط بررسی‌های میدانی، سنجش از دور، و مدل‌سازی عددی در مقیاس‌های مختلف فضایی (مثلاً، از حوضه آبریز تا مقیاس سطح مقطع) انجام شد. همه چهارچوب روش کار به صورت جزئیات شرح داده شده است. در این پژوهش بر توصیف واحدهای مکانی، تغییرات عرض کانال، و عوامل کنترل‌کننده بالقوه تمرکز شده است. برآورد دبی اوج، استفاده از توان واحد جریان، و توان سطح مقطعی جریان، همچنین برآورد درجه رسوب‌دهی سازندها و ارتباط آن‌ها با بازه‌های مورد مطالعه شرح داده شده است. بخش پایانی از بخش روش کار، تجزیه و تحلیل آماری برای توضیح پاسخ کانال به واقعه سیلاب، از طریق بررسی روابط بین تغییرات در عرض کانال و عوامل کنترل‌کننده انجام گرفت.

### ویژگی‌های مورفولوژیکی و تعیین واحدهای مکانی

اولین گام این مطالعه شامل دو مورد است: الف) تجزیه و تحلیل ویژگی‌های مورفولوژیکی؛ ب) تعیین واحدهای مکانی. این گام برای آنالیزهای بعدی به‌ویژه برای داشتن تفسیر درست از تغییرات کانال ضروری است. مواد مورد استفاده برای این گام شامل تصاویر ماهواره‌ای IRS با قدرت تفکیک مکانی ۲٫۵ متر و مدل ارتفاعی رقومی (DEM) با وضوح ۱۰ متر است. آنالیزها با نرم‌افزار GIS انجام گرفت.

### الف) تجزیه و تحلیل ویژگی‌های مورفولوژیکی

ویژگی‌های مورفولوژیکی مورد تجزیه و تحلیل مناطق کانالی پیش از سیلاب، مناطق دشت آبرفتی، پایداری جانبی، و شیب کانال بود. شناسایی مناطق کانالی پیش از سیلاب (از آنجا که عرض کانال در همه بازه‌ها بیشتر از ۵-۶ متر بود) به‌سادگی انجام گرفت. شناسایی مناطق دشت آبرفتی، با استفاده از بازدهی‌های میدانی انجام شد. دشت آبرفتی ( $W_{PI}$ ) شامل دشت سیلابی حاضر و تراس‌های پایین‌تر است؛ یعنی سطوح که می‌تواند چند متر بالاتر از دشت سیلابی باشد و به‌ندرت سیلابی شود (سوریان و همکاران، ۲۰۱۶). برای پایداری جانبی سه وضعیت دره‌ای در نظر گرفته شد: بازه‌های حفاظت‌شده؛ تا حدی حفاظت‌شده؛ و بدون حفاظت جانبی<sup>۳</sup>. درجه پایداری<sup>۴</sup> درصدی از کناره‌های کانال است که به‌طور مستقیم در ارتباط با دامنه‌ها یا تراس‌های قدیمی است (برایرلی و فرایرز، ۲۰۰۵) و شاخص پایداری<sup>۵</sup> ( $C_i$ )<sup>۱</sup> تقسیم عرض دشت آبرفتی به عرض کانال محاسبه شده است (رینالدی و همکاران، ۲۰۱۳). برای برآورد شیب کانال از DEM ده متر منطقه استفاده شد؛ به‌طوری‌که شیب در هر بازه از تقسیم اختلاف ارتفاع بر فاصله افقی محاسبه شد.

### ب) تعیین واحدهای مکانی

تعیین واحدهای مکانی (بازه‌ها) براساس دیدگاه پیشنهادشده رینالدی و همکاران (۲۰۱۳) انجام گرفت که دیدگاه ویرایش‌شده برایرلی و فرایرز (۲۰۰۵) است (جدول ۱). براساس این دیدگاه، ابتدا بخش‌های رودخانه به‌عنوان ماکرو بازه‌ها تعریف شد که ویژگی‌های مشابهی را از نظر واحدهای زمین‌شناسی و پایداری جانبی داشتند. سپس، این واحدها از نظر داشتن همگنی در شکل کانال (الگوی کانال، شیب، و عرض کانال) و هیدرولوژی به واحدهای کوچک‌تر (بازه‌ها) تقسیم شدند. همان‌طور که اشاره شد، در این پژوهش از مقیاس بازه (که طولشان بین ۱۹۷ تا ۶۲۰ متر متغیر بود) برای داشتن یک ارزیابی کلی از شدت تغییرات کانال و بررسی عوامل کنترل‌کننده استفاده شد.

1. confined reach  
2. partly confined  
3. unconfined  
4. The degree of confinement  
5. The confinement index

### تغییرات مورفولوژیکی: تجزیه و تحلیل عرض کانال

تغییرات مورفولوژیکی ناشی از سیلاب ۱۳۹۴ ایلام توسط بازدیدهای میدانی و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای IRS با قدرت تفکیک ۲/۵ متر و تصاویر گوگل ارث قبل و بعد از سیلاب محاسبه شد. مقیاس مورد استفاده در این مطالعه بازه‌ها بودند که گسترش عرضشان با مقایسه تصاویر ماهواره‌ای قبل و بعد از سیلاب بررسی شد.

تصاویر ماهواره‌ای IRS با قدرت مکانی ۲/۵ متر برای زیرحوضه‌های مورد مطالعه استفاده شد. برای ارزیابی تغییرات در عرض کانال، سواحل کانال در تصاویر ماهواره‌ای قبل و بعد از سیلاب دیجیت شدند. عرض کانال در هر بازه از تقسیم مساحت کانال به طول بازه محاسبه شد و تغییرات در عرض کانال به‌عنوان یک نسبت عرض<sup>۱</sup> (عرض کانال بعد از سیلاب به عرض کانال قبل از سیلاب) ابراز شد (کراپچ و همکاران، ۲۰۱۱).

### تجزیه و تحلیل هیدرولیکی: برآورد دبی اوج

در این پژوهش، به‌عنوان یکی از عوامل کنترل‌کننده سیلاب، دبی اوج در هر بازه مورد نیاز بود که از یک روش مناسب برای برآورد آن استفاده شد. یکی از روش‌های تخمین رواناب در حوضه‌های فاقد اندازه‌گیری دبی<sup>۲</sup> روش شماره<sup>۳</sup> منحنی رواناب سازمان حفاظت خاک امریکا است.

جدول ۱. خلاصه‌ای از روش ارزیابی برای تعیین بازه‌ها (منبع: رینالدی و همکاران، ۲۰۱۳)

مرحله	معیار	خروجی
مرحله اول: شناسایی واحدهای فیزیوگرافی و بخش‌ها	ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیک	واحدهای زمین‌شناسی
مرحله دوم: تعریف نوع پایداری	حفاظت‌های جانبی	انواع حفاظت: حفاظت‌شده تا اندازه‌های حفاظت‌شده حفاظت‌نشده
مرحله سوم: شناسایی نوع مورفولوژی رودخانه	ویژگی‌های پلانیمتریک (سینوسیته، انشعاب، و شاخص آناستوموس)	انواع مورفولوژی: حفاظت‌شده: رشته‌ای، سرگردان، شریانی تا اندازه‌های حفاظت‌شده و حفاظت‌نشده: مستقیم، سینوسی، ماندری، سرگردان، شریانی
مرحله چهارم: تقسیم‌بندی بازه‌های رودخانه	ناهمگنی در هیدرولوژی، شیب بستر، عرض رودخانه، عرض دشت آبرفتی و رسوب بستر	بازه‌ها

بدین منظور، با استفاده از نرم‌افزار Arc hydro به تقسیم‌بندی هر حوضه به زیرحوضه‌های کوچک‌تر محاط بر هر بازه اقدام شد. سپس، شماره<sup>۳</sup> منحنی در هر یک از زیرحوضه‌ها تعیین شد. سپس، با استفاده از روش SCS به تعیین ارتفاع رواناب و دبی اوج در هر یک از بازه‌ها اقدام شد. در روش SCS، تعیین شماره<sup>۳</sup> منحنی، که تابعی از ویژگی‌های خاک، کاربری اراضی، خصوصیات هیدرولوژیکی مانند رطوبت پیشین خاک است، ضروری است. روش SCS به‌سبب سادگی آن خیلی سریع به یکی از رایج‌ترین روش‌ها در میان مهندسان و کارشناسان تبدیل شده و اساساً برای حوضه‌های کوچک شهری و کشاورزی، حوضه‌های طبیعی متوسط، و همچنین برای حوضه‌هایی که در آن‌ها داده‌های اندازه‌گیری دبی رواناب وجود ندارد به‌کار می‌رود (میشرا و همکاران، ۲۰۰۶). علاوه بر این، مدلی است پیش‌بینی‌کننده، که ورودی‌های محیطی را به‌خوبی ثبت می‌کند و روش تأییدشده‌ای است که به‌طور گسترده در امریکا و دیگر کشورها پذیرش شده است (کومار و همکاران، ۲۰۱۰). در این روش ارتفاع رواناب ناشی از باران براساس رابطه<sup>۱</sup> محاسبه می‌شود:

1. width ratio

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (1)$$

در این رابطه، Q ارتفاع رواناب به میلی‌متر، P ارتفاع بارندگی ۲۴ ساعته، و S مقدار ذخیره سطحی خاک است. میزان S با نوع پوشش و نحوه بهره‌برداری از اراضی و وضعیت سطح خاک از نظر نفوذپذیری و داخل خاک از نظر انتقال ارتباط دارد. برای S یک مقدار حداقل و یک مقدار حداکثر وجود داشته که به رطوبت قبلی خاک بستگی دارد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها در حوضه‌های مختلف نشان داده که از کل تلفات بالقوه حوضه یا S به‌طور متوسط ۰/۲ آن قبل از شروع جریان یافتن هرزاب به‌صورت تلفات اولیه عمل می‌کند و ۰/۸ بقیه در طول بارش صرف نفوذ سطحی و عمقی در خاک می‌شود. بنابراین، در هر مورد، چنانچه ارتفاع بارندگی کمتر از ۰/۲ S باشد، فرض می‌شود که رواناب به‌وجود نخواهد آمد. مقدار تلفات کل یا S توسط رابطه ۲، با یک عامل بدون بُعد به نام CN<sup>۱</sup> ارتباط می‌یابد.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

مقدار CN بین صفر تا ۱۰۰ متغیر است؛ در CN برابر صفر رواناب از بارندگی حاصل نیامده و در CN برابر ۱۰۰ همه بارش در سطح زمین جریان یافته و ارتفاع رواناب برابر با ارتفاع بارندگی خواهد بود. محاسبه CN براساس گروه‌های هیدرولوژیکی خاک، بهره‌وری از زمین، وضعیت هیدرولوژیکی اراضی، و وضعیت رطوبت پیشین خاک انجام می‌پذیرد (مهدوی، ۱۳۹۱).

در این پژوهش با در نظر گرفتن رطوبت پیشین در حالت متوسط (II) مقادیر وزنی CN برای هر یک از زیرحوضه‌ها و مناطق همگن هیدرولوژیک براساس رابطه ۳ به‌دست آمده است:

$$\overline{CN} = \left[ \sum \left( \frac{A_i}{100} \right) (CN_i) \right] \quad (3)$$

که در آن  $\overline{CN}$  میانگین وزنی شماره منحنی حوضه و  $A_i$  درصد مساحتی از حوضه که شماره منحنی آن  $CN_i$  است. پس از تعیین ارتفاع رواناب سطحی ناشی از رگبار، زمان رسیدن به دبی اوج و مقدار دبی اوج حاصل می‌شود. در مرحله بعد لازم بود که زمان تمرکز در هر بازه محاسبه شود و این عامل با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد.

$$T_C = 0.0195 L^{0.77} S^{-0.385} \quad (4)$$

که در آن  $T_C$  زمان تمرکز بر حسب ساعت، L طول‌ترین مسیری که آب طی می‌کند به متر، و S شیب متوسط آبراهه اصلی بر حسب متر به متر است.

زمان رسیدن دبی به نقطه اوج نیز از رابطه ۵ به‌دست آمد:

$$T_p = 0.6T_C + \sqrt{T_C} \quad (5)$$

که در آن  $T_C$  زمان تمرکز بر حسب ساعت و  $T_p$  زمان رسیدن به اوج بر حسب ساعت است. در نهایت، دبی اوج با توجه به رابطه ۶ محاسبه شد:

$$Q_p = \frac{0.208AR}{T_p} \quad (6)$$

که در آن  $Q_p$  دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)،  $A$  مساحت حوضه بر حسب کیلومتر مربع،  $R$  مقدار رواناب به سانتی‌متر، و  $T_p$  زمان رسیدن به اوج بر حسب ساعت است (مهدوی، ۱۳۹۱).

### بررسی نقش عوامل انسانی در تشدید میزان تغییرات رودخانه ناشی از سیلاب

برای بررسی این مورد، پل‌ها و سازه‌های انسانی، بندهای انحرافی انتقال آب از رودخانه به اراضی کشاورزی، جاده‌های ارتباطی در مسیر سیلاب و عملیات کشاورزی و باغات ایجادشده در دشت‌های سیلابی اطراف رودخانه و در خیلی از موارد حتی در بستر رودخانه به دلیل سهولت دسترسی به منابع آبی از طریق بازدیدهای میدانی شناسایی شد تا تأثیر آن‌ها در تشدید سیلاب مشخص شود (شکل ۲). متغیر کمی در این بررسی درصد طول سازه‌های مصنوعی با بازه‌های مورد مطالعه بود ( $A_s$ )<sup>۱</sup>.



شکل ۲. نمونه‌هایی از عوارض انسانی موجود در بازه‌های مورد مطالعه (منبع: نگارندگان)

### برآورد درجه رسوب‌دهی در بازه‌های مورد مطالعه

شکل هندسی و رفتار هر رودخانه به شدت به رسوب و دبی حوضه بالادستی، میانه، و بخش پایانی خود وابسته است (مقیمی، ۱۳۸۸). رسوب فراهم‌شده به شبکه زهکشی در طول سیلاب بستگی به حساسیت سازندهای موجود در منطقه مورد مطالعه دارد. سنگ‌های ماری موجود در سطح حوضه در مقابل عوامل فرسایش بسیار ضعیف است و سالانه حجم قابل توجهی از رسوبات ناشی از فرسایش این سنگ‌ها به همراه سیلاب‌ها از این حوضه خارج می‌شود. به منظور برآورد درجه رسوب‌دهی از یافته‌های پایان‌نامه رستمی (۱۳۸۷)، که در رابطه با درجه رسوب‌دهی سازندهای حوضه سد ایلام بر مبنای مدل ام‌پسیاک کار کرده بود، استفاده شد و درجه رسوب‌دهی ( $D_s$ ) در هر بازه به صورت وزنی تهیه شد (جدول ۲).

### تجزیه و تحلیل عوامل کنترل‌کننده

تجزیه و تحلیل عوامل کنترل‌کننده در مقیاس بازه، با توجه به چهار عامل ژئومورفولوژیک و سه عامل هیدرولیک، انجام شد. عوامل ژئومورفولوژیک شامل شیب کانال ( $S$ ) به عنوان یک نماینده از مورفولوژی رودخانه، شاخص پایداری ( $C_i$ )، که نشان‌دهنده عرض دشت آبرفتی و پایداری جانبی نسبت به گسترش کانال است، درصد ساختارهای مصنوعی ( $A_s$ )، که

1. Artificial structures

می‌تواند مانع تحرک جوانب کانال شود، و در نهایت درجه رسوب‌دهی ( $D_s$ ) در هر بازه است. انرژی جریان با در نظر گرفتن سه متغیر هیدرولیک، که به‌طور نزدیکی مرتبط با توان سیلاب‌اند، تجزیه و تحلیل شد. توان سطح مقطعی جریان ( $\Omega$ ) به‌صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود:

$$\Omega = \gamma QS \quad (7)$$

که در آن  $\gamma$  وزن مخصوص آب ( $Nm^{-3}$ )،  $Q$  دبی پیک ( $m^3 s^{-1}$ )، و  $S$  شیب کانال ( $mm^{-1}$ ) است. توان واحد جریان ( $\omega$ ) از تقسیم توان سطح مقطعی جریان به عرض کانال، که قبل و بعد از سیلاب اندازه‌گیری شده است، به‌صورت رابطه‌های ۸ و ۹ به‌دست آمد (سوریان و همکاران، ۲۰۱۶).

$$\omega_{\text{before}} = \Omega / W_{\text{before}} \quad (8)$$

$$\omega_{\text{after}} = \Omega / W_{\text{after}} \quad (9)$$

از این‌رو، تجزیه و تحلیل آماری با توجه هفت متغیر ژئومورفولوژیک و هیدرولیک انجام شد. با توجه به متغیرهای مستقل مجزا مربوط به انرژی جریان (شامل شیب کانال، توان جریان سطح مقطع، و توان واحد جریان)، تجزیه و تحلیل رگرسیون چندمتغیره به‌منظور بررسی مجموعه‌ای از متغیرها استفاده شد که بهترین تبیین از پاسخ کانال (گسترش کانال) را داد. نرم‌افزار SPSS برای همه تجزیه و تحلیل‌های آماری استفاده شد.

## یافته‌های پژوهش

### تغییرات مورفولوژیک در مقیاس بازه

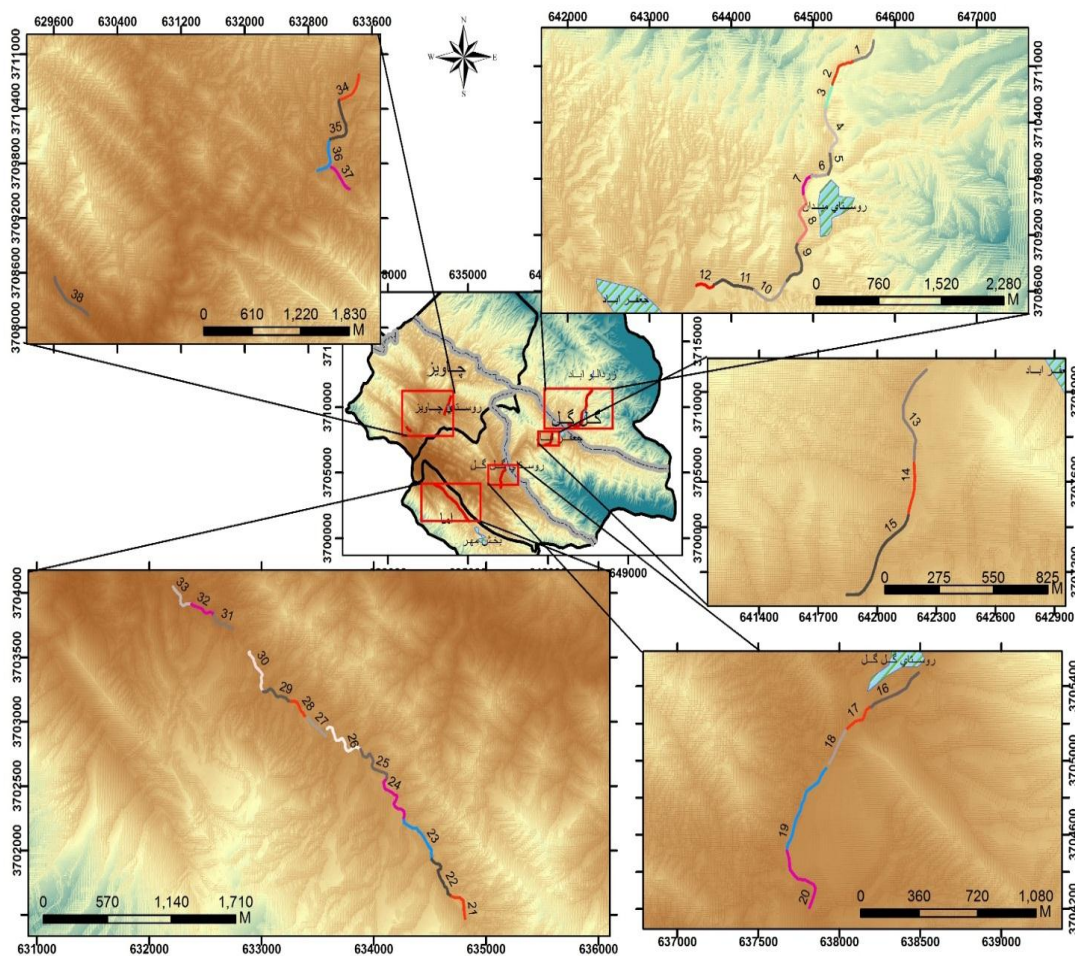
در این بخش ویژگی‌های مورفولوژیک رودخانه‌های مورد مطالعه و تغییرات رودخانه، که در طول سیلاب آبان‌ماه ۱۳۹۴ متحمل شد، در مقیاس بازه نشان داده شده است. هدف از این بخش نشان دادن تغییرات و تجزیه و تحلیل برخی از عوامل محتمل است که می‌تواند نقش مهمی در پاسخ ژئومورفولوژیک رودخانه ایفا کند. به دنبال روش تعیین‌شده، که در بالا توصیف شد، بخش‌های رودخانه و بازه‌های آن در سه حوضه مشخص شد. سپس، تنها بخشی از بازه‌های نیمه‌حفاظت‌شده و حفاظت‌نشده برای تجزیه و تحلیل مورفولوژیک در نظر گرفته شد. حداقل، متوسط، و حداکثر طول در ۳۸ بازه مورد مطالعه به‌ترتیب عبارت‌اند از: ۱۹۷، ۴۰۴، و ۶۲۰ متر (شکل ۳). در همه این بازه‌ها ویژگی‌های رودخانه‌های کوهستانی از نظر شیب، عرض کانال، و پایداری جانبی نشان داده شده است (جدول ۲). شیب کانال بین ۰/۹۷ و ۱۷/۰۵ درصد با میانگین ۵/۱۹ درصد در ۳۸ بازه متغیر بود. تغییرات عرض کانال مابین ۲ تا ۲۹ متر، با میانگین ۱۲/۵ متر بوده و محدوده شاخص پایداری بین ۱ تا ۵/۰۳ است. با توجه به چنین طیف وسیعی از ویژگی‌های مورفولوژیک، مجموعه داده‌ها این چنین تجزیه و تحلیل شد: گسترش کانال در ۳۷ بازه رخ داده است؛ درحالی‌که تغییری در عرض کانال بازه ۷ رودخانه اما تشخیص داده نشد (نگاه کنید به نسبت عرض در جدول ۲). شدیدترین تغییرات در امتداد رودخانه گل‌گل (بازه ۱۲) رخ داده است که در آن عرض کانال از ۱۹/۷ به ۴۸/۵ متر رسیده است. به استثنای بازه ۷، رودخانه اما، که بدون گسترش عرضی است و دلیل آن هم وجود پایداری جانبی از دو طرف است، ۴ بازه دیگر هم وجود داشت که گسترش عرضی قابل‌توجهی در آن‌ها مشاهده نشد. دو بازه از رودخانه اما (بازه‌های ۸ و ۱۰) و بازه ۵ گل‌گل، که در آن‌ها گسترش کانال شدت کمتری داشت (نسبت عرض به‌ترتیب در این سه بازه ۱/۳۱، ۱/۱۹، و ۱/۲۴ بود)، سازه‌های مصنوعی (به‌ترتیب در طول ۳۵ درصد و ۵۰ درصد و ۴۷ درصد از بازه‌های ذکرشده) در این موارد بسیار تأثیرگذار بوده‌اند.



در بازه ۱۸ رودخانه گل‌گل نیز با وجود اینکه هیچ ساختار مصنوعی در امتداد این بازه وجود نداشت، در عوض، کمترین درجه رسوبدهی مربوط به این بازه بوده که به احتمال زیاد به‌عنوان عاملی محدودکننده برای گسترش رودخانه عمل کرده است. از طرفی، در ۳ بازه رودخانه گل‌گل (بازه‌های ۱۲، ۱۳، و ۱۴)، که دارای نسبت عرض بالایی بودند (به ترتیب ۲،۴۵، ۲،۰۳، و ۲،۰۶) و گسترش عرضی قابل توجهی داشتند، هیچ ساختار مصنوعی دیده نشد. علاوه بر آن، این سه بازه دارای شاخص پایداری (C<sub>i</sub>) و درجه رسوبدهی بالایی بودند که تأییدی بر نتایج فوق است.

### تخمین دبی پیک

برآورد دبی پیک سیلاب با استفاده از روش SCS در سطح مقطع‌های مختلف واقع در انتهای هر بازه از رودخانه‌های مورد بررسی انجام شد. با برآورد دبی پیک، توان سطح مقطعی جریان، و توان واحد جریان در مقیاس بازه محاسبه شد (جدول ۲). دبی اوج بین محدوده ۲۰ تا ۳۶۴ مترمکعب در ثانیه به ترتیب در بازه‌های ۳۷ رودخانه چاوین و ۲۰ رودخانه گل‌گل متغیر بود. توان سطح مقطعی جریان بین ۲۴۹۴۱ و ۱۵۹۱۲۰  $Wm^{-1}$  متغیر بود. توان واحد جریان با استفاده از عرض کانال قبل از سیلاب بین ۷۷۸ و ۱۰۶۳۱  $Wm^{-2}$  بوده؛ درحالی‌که با استفاده از عرض کانال پس از سیلاب در محدوده بین ۴۸۹ و ۵۶۳۹  $Wm^{-2}$  برآورد شد.



شکل ۳. ۳۸ بازه مورد مطالعه در سه حوضه گل‌گل، اما، و چاوین

جدول ۲. ویژگی‌های مورفولوژیکی، تغییرات عرض کانال، و عوامل کنترل کننده در مقیاس بازه

$D_s$	$\omega_{after}$ ( $W m^{-2}$ )	$\omega_{before}$ ( $W m^{-2}$ )	$\Omega$ ( $wm^{-1}$ )	$Q_{pk}$ ( $m^3 s^{-1}$ )	$A_s$ (%)	$W_{ratio}$	$W_{after}$ (m)	$W_{before}$ (m)	$C_i$	$W_{pl}$ (m)	$S$ ( $mm^{-1}$ )	$L$ (m)	reach
<b>حوضه گل گل</b>													
۸۳٫۱	۱۰۲۲	۱۷۱۵	۳۸۱۵۱	۱۷۳٫۷	۱۳٫۶	۱٫۶۸	۳۷٫۳۱	۲۲٫۲۴	۲٫۷۵	۶۱٫۲	۰٫۰۲۲	۳۹۲	۱
۸۱٫۷	۳۰۰۲	۴۸۰۷	۶۶۱۵۰	۱۸۹	۴۹	۱٫۶۰	۲۲٫۰۳	۱۳٫۷۶	۲٫۶۹	۳۷	۰٫۰۲۶	۴۱۳	۲
۸۳	۴۱۶۵	۷۳۱۵	۱۱۷۸۸۹	۱۸۹٫۵	۳۶٫۹	۱٫۷۶	۲۸٫۳	۱۶٫۱۲	۱٫۸۶	۳۰	۰٫۰۶۳	۲۴۱	۳
۸۱٫۵	۴۹۵۴	۶۱۵۸	۱۰۳۹۸۴	۱۹۱٫۳	۴۷٫۲	۱٫۲۴	۲۰٫۹۹	۱۶٫۸۸	۲٫۳۶	۳۹٫۹	۰٫۰۵۵	۵۵۳	۴
۸۴٫۵	۲۷۹۸	۴۷۹۱	۷۹۸۷۳	۱۹۲٫۳	۴۳٫۷	۱٫۷۱	۲۸٫۵۴	۱۶٫۶۷	۳٫۱۶	۵۲٫۶	۰٫۰۴۲	۲۴۷	۵
۸۴٫۴	۵۴۸۳	۹۳۱۲	۵۸۸۳۱	۲۰۴٫۱	.	۱٫۹۵	۱۲٫۳۵	۶٫۳۲	۲٫۲۵	۱۴٫۲	۰٫۰۲۹	۱۹۷	۶
۸۲٫۴	۱۲۸۵	۱۵۹۵	۶۶۳۷۷	۲۰۴٫۶	.	۱٫۲۴	۵۱٫۶۴	۴۱٫۶۱	۱٫۷۶	۷۳٫۴	۰٫۰۳۳	۲۴۱	۷
۸۶٫۳	۱۱۲۰	۱۹۴۸	۵۸۴۵۰	۲۰۵٫۱	.	۱٫۷۴	۵۲٫۱۶	۳۰	۲٫۵۹	۷۷٫۶	۰٫۰۲۹	۶۰۷	۸
۸۰٫۸	۲۹۳۴	۴۱۵۲	۱۱۰۰۶۶	۲۰۶٫۳	۱۲٫۶	۱٫۴۲	۳۷٫۵۱	۲۶٫۵	۲٫۰۱	۵۳٫۴	۰٫۰۵۴	۵۴۷	۹
۸۰٫۶	۲۹۵۹	۴۸۸۶	۱۱۲۸۷۶	۲۰۶٫۹	.	۱٫۶۵	۳۸٫۱۳	۲۳٫۱	۲٫۹۵	۶۸٫۲	۰٫۰۵۶	۵۲۶	۱۰
۸۰٫۸	۱۱۵۵	۱۷۲۲	۶۶۲۹۶	۲۰۸٫۱	.	۱٫۴۹	۵۷٫۳۷	۳۸٫۴۸	۲٫۱۶	۸۳٫۳	۰٫۰۳۳	۵۲۱	۱۱
۷۹٫۹	۱۸۹۶	۴۶۵۳	۹۲۰۲۰	۲۰۹٫۱	.	۲٫۴۵	۴۸٫۵۱	۱۹٫۷۸	۵۰٫۳	۹۹٫۴	۰٫۰۴۵	۲۴۲	۱۲
۸۲	۱۵۲۱	۳۰۸۱	۸۷۷۴۲	۲۰۹٫۵	.	۲٫۰۳	۵۷٫۶۸	۲۸٫۴۷	۳٫۰۳	۸۶٫۴	۰٫۰۴۳	۴۶۳	۱۳
۷۵٫۳	۷۸۹	۱۶۲۱	۳۱۰۴۳	۲۵۲٫۴	.	۲٫۰۶	۳۹٫۳۵	۱۹٫۱۴	۴٫۴۳	۸۴٫۸	۰٫۰۱۳	۲۴۳	۱۴
۷۵٫۲	۴۷۶۹	۷۳۳۴	۱۵۷۶۲۷	۲۵۷٫۴	.	۱٫۵۴	۳۳٫۰۵	۲۱٫۵۲	۲٫۳۵	۵۰٫۶	۰٫۰۶۳	۵۱۸	۱۵
۷۲٫۸	۱۶۲۱	۲۱۶۸	۹۲۱۶۵	۳۳۵٫۷	۴۵٫۱	۱٫۳۴	۵۶٫۸۴	۴۲٫۴۹	۲٫۷۶	۱۱۷	۰٫۰۲۸	۳۶۴	۱۶
۶۷٫۵	۲۳۴۸	۳۱۹۴	۹۵۳۳۱	۳۴۰٫۵	.	۱٫۴۲	۴۲٫۴	۲۹٫۸۴	۲٫۲۳	۶۶٫۵	۰٫۰۲۹	۲۰۷	۱۷
۶۰٫۵	۴۵۶۴	۴۸۷۲	۱۵۹۱۲۰	۳۴۷٫۵	.	۱٫۰۷	۳۴٫۸۶	۳۲٫۶۶	۱٫۱۴	۳۷٫۳	۰٫۰۴۷	۲۱۳	۱۸
۶۸٫۵	۵۸۱	۹۵۳	۳۹۴۵۴	۳۵۲٫۳	.	۱٫۶۴	۶۷٫۸	۴۱٫۳۶	۲٫۲۵	۹۳٫۲	۰٫۰۱۱	۵۴۰	۱۹
۷۴٫۴	۵۸۴	۸۷۹	۳۴۷۴۵	۳۶۴٫۳	.	۱٫۵۱	۵۹٫۵	۳۹٫۵۲	۲٫۰۱	۷۹٫۵	۰٫۰۱۰	۴۲۰	۲۰
<b>حوضه اما</b>													
۷۹٫۶	۱۴۲۸	۱۸۳۸	۵۸۹۴۴	۶۲٫۶	۲۸٫۳	۱٫۲۹	۴۱٫۲۶	۳۲٫۰۶	۱٫۸۳	۵۸٫۷	۰٫۰۹۶	۲۷۹	۱
۷۸٫۵	۲۱۹۱	۳۲۲۸	۵۷۹۹۲	۷۲٫۳	۴٫۷	۱٫۴۷	۲۶٫۴۶	۱۷٫۹۶	۱٫۵۸	۲۸٫۴	۰٫۰۸۲	۲۸۵	۲
۷۹٫۴	۱۱۳۳	۱۷۴۲	۵۰۹۷۲	۷۴٫۸	.	۱٫۵۴	۴۴٫۹۷	۲۹٫۲۶	۲٫۳۰	۶۷٫۲	۰٫۰۷۰	۴۲۲	۳
۷۹٫۳	۵۷۲	۷۷۸	۲۴۹۴۱	۷۵٫۲	.	۱٫۳۶	۴۳٫۵۸	۳۲٫۰۳	۲٫۳۳	۷۴٫۶	۰٫۰۳۴	۴۳۷	۴
۷۵٫۴	۹۹۵	۱۵۲۶	۳۹۰۴۹	۷۶٫۲	.	۱٫۵۳	۳۹٫۲۲	۲۵٫۵۸	۲٫۶۳	۶۷٫۴	۰٫۰۵۲	۴۳۳	۵
۷۸٫۳	۴۸۹	۸۷۱	۲۵۱۷۶	۷۷٫۶	.	۱٫۷۸	۵۱٫۴۹	۲۸٫۸۸	۳٫۵۳	۱۰۲	۰٫۰۳۳	۴۲۷	۶
۸۱	۲۴۳۸	۲۴۳۹	۲۷۸۶۲	۷۹٫۳	.	۱٫۰۰	۱۱٫۴۲	۱۱٫۴۲	u.c	-	۰٫۰۲۶	۲۲۲	۷
۸۱٫۱	۱۸۷۸	۲۴۵۱	۳۲۴۸۳	۷۹٫۶	۳۵٫۸	۱٫۶۶	۲۲٫۰۱	۱۳٫۲۵	۴٫۰۶	۵۳٫۸	۰٫۰۴۲	۲۱۲	۸
۸۵٫۱	۲۱۳۸	۴۰۰۸	۵۸۶۹۶	۸۰	۲۸٫۵	۱٫۸۷	۲۷٫۴۴	۱۴٫۶۴	۲٫۸۴	۴۱٫۶	۰٫۰۷۵	۲۸۷	۹
۷۹٫۴	۱۲۵۰	۱۴۹۱	۲۵۵۸۴	۸۰٫۹	۵۰٫۱	۱٫۱۹	۲۰٫۴۶	۱۷٫۱۵	۱٫۹۲	۳۲٫۹	۰٫۰۳۲	۳۶۹	۱۰
۷۷٫۶	۵۶۳۹	۱۰۶۳۱	۱۲۹۵۵۳	۸۱٫۴	.	۱٫۸۹	۲۲٫۹۷	۱۲٫۱۹	۲٫۱۲	۲۵٫۸	۰٫۱۶۲	۲۲۷	۱۱
۷۸	۱۱۵۶	۱۹۱۸	۴۱۶۵۶	۸۱٫۸	.	۱٫۶۶	۳۶٫۰۲	۲۱٫۷۱	۲٫۰۹	۴۵٫۳	۰٫۰۵۲	۲۲۹	۱۲
۷۴٫۵	۶۳۲	۸۰۵	۲۷۶۹۴	۸۲	.	۱٫۲۷	۴۳٫۷۸	۳۴٫۳۷	۱٫۴۵	۴۹٫۹	۰٫۰۳۴	۲۳۵	۱۳
<b>حوضه چاويز</b>													
۶۸	۲۵۲۰	۲۹۱۷	۱۵۲۹۸۴	۱۷۵	.	۱٫۱۶	۶۰٫۶۹	۵۲٫۴۵	۱٫۵۹	۸۳٫۳	۰٫۰۸۹	۴۱۰	۱
۶۷٫۳	۲۷۰۵	۳۴۴۳	۹۵۱۱۴	۱۷۶٫۵	۳۵٫۹	۱٫۲۷	۳۵٫۱۶	۲۷٫۶۲	۱٫۹۵	۵۳٫۸	۰٫۰۵۵	۵۹۳	۲
۷۴٫۱	۲۲۸۱	۳۰۳۹	۷۵۵۵۲	۱۸۷٫۹	۵۴٫۲	۱٫۳۳	۳۳٫۱۲	۲۴٫۸۵	۲٫۰۰	۴۹٫۸	۰٫۰۴۱	۴۷۹	۳
۶۷٫۷	۱۱۸۰	۱۶۴۲	۳۴۶۶۹	۲۰٫۸	.	۱٫۳۹	۲۹٫۳۷	۲۱٫۱	۱٫۹۸	۴۱٫۷	۰٫۱۷۰	۳۵۱	۴
۷۴٫۲	۱۴۹۶	۲۰۶۶	۵۰۵۵۷	۶۷٫۸	۲٫۴	۱٫۳۸	۳۳٫۷۹	۲۴٫۴۶	۱٫۶۸	۴۱	۰٫۰۷۶	۶۲۰	۵

توضیحات جدول ۲: reach: بازه؛ L:(length): طول بازه؛ S:(slope): شیب بازه؛  $W_{pl}$ (width of the alluvial plain): عرض دشت آبرفتی؛  $C_i$ (confinement index): شاخص پایداری؛  $W_{before}$ (channel width before the flood): عرض کانال قبل از سیلاب؛  $W_{after}$ (channel width after the flood): عرض کانال بعد از سیلاب؛  $W_{ratio}$ (channel width after the flood,channel width before the flood): نسبت عرض؛  $A_s$  (percentage of reach length with artificial structures): درصد طول بازه با ساختارهای انسانی؛  $Q_{pk}$ (peak discharge): دبی پیک؛  $\Omega$ (cross-sectional stream power at the peak discharge): توان سطح مقطعی جریان در دبی پیک؛  $\omega_{before}$ (unit stream power calculated based on channel width before the flood): توان واحد جریان محاسبه شده براساس عرض کانال قبل از سیلاب؛  $\omega_{after}$ (unit stream power calculated based on channel width after the flood): توان واحد جریان محاسبه شده براساس عرض کانال بعد از سیلاب؛  $D_s$ (Degree of sediment): درجه رسوبدهی

### تجزیه و تحلیل عوامل کنترل‌کننده

روابط بین درجه گسترش کانال و عوامل کنترل‌کننده احتمالی با استفاده از رگرسیون چندمتغیره انجام شد. تجزیه و تحلیل برای گسترش کانال (نسبت عرض) در مقیاس بازه انجام شد. مجموعه داده‌ها شامل ۳۸ بازه با حداقل، متوسط، و حداکثر طول به ترتیب ۱۹۷، ۴۰۴، و ۶۲۰ متر بود. هفت متغیر کنترلی در نظر گرفته شد. این متغیرها شامل شاخص پایداری، درصد طول بازه با ساختارهای مصنوعی، درجه رسوب‌دهی، شیب کانال، توان سطح مقطعی جریان، و توان واحد جریان با استفاده از عرض کانال قبل و بعد از سیلاب بود. در هر مدل رگرسیون فقط چهار متغیر گنجانیده شده است. هر مدل فقط دربرگیرنده یکی از متغیرهای بیان‌کننده انرژی جریانی سیلاب است (شامل شیب کانال، توان جریان سطح مقطعی، و توان واحد جریان قبل و بعد از سیلاب). بر روی همه مجموعه داده‌ها تجزیه و تحلیل انجام گرفت. هر چهار مدل رگرسیون چندمتغیره دارای سطح معنی‌داری ( $P < 0.001$ ) بودند و ضرایب بالایی از تبیین چندمتغیره را دارا بودند ( $R^2$  و  $R^2$  تعدیل شده به ترتیب در محدوده ۰.۷۳ تا ۰.۸ و ۰.۶۹ تا ۰.۷۷ قرار گرفت) (جدول ۳).

بنابراین، بهترین مدل مدل توان واحد جریان براساس عرض کانال قبل از سیلاب و شاخص پایداری بود که به‌عنوان متغیرهای توضیحی وارد شدند (مدل ۳ در جدول ۳).

$$W_{ratio} = 0.082 + 0.268 * C_i - 0.005 AS + 0.01 DS + 0.0000386 W_{before} \quad (10)$$

که در آن  $W_{ratio}$  نسبت عرض کانال پس از سیلاب به عرض کانال قبل از سیلاب است،  $W_{before}$  توان واحد جریان براساس عرض کانال پیش از سیلاب،  $C_i$  شاخص پایداری،  $AS$  درصد طول بازه با ساختارهای مصنوعی، و  $DS$  درجه رسوب‌دهی است. متغیر شاخص پایداری بهترین پیش‌بینی‌کننده نسبت عرض (معنی‌دار در همه مدل‌ها  $R^2 = 0.6$ ) بود. روابط معنی‌دار با مقادیر کم  $R^2$  همراه بود؛ به‌طوری‌که برای درجه رسوب‌دهی ( $R^2 = 0.17$ )، توان واحد جریان محاسبه‌شده در دو روش یعنی با استفاده از عرض کانال قبل و بعد از سیلاب (به ترتیب  $R^2 = 0.087$  و  $R^2 = 0.004$ )، و با درصد طول بازه با سازه‌های مصنوعی ( $R^2 = 0.03$ ) به‌دست آمد. شیب کانال و توان سطح مقطعی جریان ضعیف یا بسیار ضعیف بودند و از نظر آماری معنی‌دار نبودند ( $P > 0.05$ ).

جدول ۳. مدل‌های رگرسیون چندمتغیره بین نسبت عرض و عوامل کنترل‌کننده برای کل مجموعه داده‌ها

	Model 1		Model 2		Model 3		Model 4	
	$R^2$	p-value	$R^2$	p-value	$R^2$	p-value	$R^2$	p-value
$R^2$	۰.۷۳۱		۰.۷۳۱		۰.۸		۰.۷۵۴	
$R^2_{adj}$	۰.۶۹۹		۰.۶۹۸		۰.۷۷۶		۰.۷۲۴	
p-value	<۰.۰۰۱		<۰.۰۰۱		<۰.۰۰۱		<۰.۰۰۱	
	$R^2$	p-value	$R^2$	p-value	$R^2$	p-value	$R^2$	p-value
$C_i$	۰.۶۰۷	<۰.۰۰۱	۰.۶۰۷	<۰.۰۰۱	۰.۶۰۷	<۰.۰۰۱	۰.۶۰۷	<۰.۰۰۱
$AS$	۰.۰۳	۰.۰۰۸	۰.۰۳	۰.۰۰۴	۰.۰۳	۰.۰۰۱	۰.۰۳	۰.۰۰۱
$DS$	۰.۱۷	۰.۰۱۲	۰.۱۷	۰.۰۰۸	۰.۱۷	۰.۰۲۹	۰.۱۷	۰.۰۱۷
$S$	۰.۰۰۲۸	۰.۱۳۸	-	-	-	-	-	-
$\Omega$	-	-	۰.۰۰۳	۰.۱۴۴	-	-	-	-
$\omega_{before}$	-	-	-	-	۰.۰۸۷	۰.۰۰۱	-	-
$\omega_{after}$	-	-	-	-	-	-	۰.۰۰۰۴	۰.۰۲۵

نسبت عرض ارتباط واضحی با پنج متغیر شاخص پایداری، درجه رسوب‌دهی، درصد طول بازه با سازه‌های مصنوعی، و توان واحد جریان محاسبه شده براساس عرض کانال قبل و پس از سیلاب نشان داد. روابط با دو متغیر دیگر (شیب کانال و توان سطح مقطعی جریان) ضعیف و از نظر آماری معنی‌دار نبودند ( $P > 0.05$ ).

ذکر کردنی است که شدیدترین گسترش کانال در بازه‌های ۱۲، ۱۳، و ۱۴ رودخانه گل‌گل رخ داده است که با بالاترین مقادیر توان واحد جریان (جدول ۲) همراه نیستند. از این رو، جالب است بدانیم روابط بین نسبت عرض و عوامل کنترل‌کننده خطی نیست. این کمک می‌کند تا توضیح دهیم که چرا مدل‌های رگرسیون چندمتغیره، که به روابط خطی تکیه می‌کنند، ضرایب تبیین بسیار بالایی ندارند.

### اعتبارسنجی مدل

مدل ابداعی در بازه‌های انتخاب شده (هشت بازه) اجرا شد و خروجی آن با داده‌های واقعی (اندازه‌گیری شده در همان بازه) با استفاده از روش‌های مختلف میانگین خطای نسبی (MRE)، میانگین توان دوم خطا (MSE)، و جذر میانگین توان دوم خطا (RMSE) برای تعیین مقدار صحت مدل ابداعی بررسی شد (جدول ۴). برای مدل ابداعی، مقادیر میانگین خطای نسبی، میانگین توان دوم خطا، و جذر میانگین توان دوم خطا به ترتیب کمتر از ۱۰ درصد، ۰/۰۱ و ۰/۱ به دست آمد که نشان می‌دهد مدل‌ها از اعتبار خیلی خوبی برخوردارند و از آن می‌توان برای پیش‌بینی مقدار تغییرات مورفولوژیک کانال در مناطقی با شرایط مشابه منطقه مورد مطالعه بهره گرفت.

جدول ۴. نتایج اعتبارسنجی مدل ابداعی در منطقه

شماره بازه	ob	Es	RE	MRE	SE	MSE	RMSE
۱	۱/۷۱	۱/۶۸	۱/۹		۰/۰۰۱۱		
۲	۱/۹۹	۱/۹۱	۴/۲		۰/۰۰۷۰		
۳	۲/۵۰	۲/۴۵	۲/۲		۰/۰۰۳۰		
۴	۱/۴۵	۱/۵۰	۳/۶	۳/۴۲	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۰۴	۰/۰۶۳
۵	۱/۵۰	۱/۴۱	۵/۹		۰/۰۰۷۸		
۶	۱/۵۶	۱/۶۳	۴/۳		۰/۰۰۴۵		
۷	۱/۳۰	۱/۲۷	۲/۲		۰/۰۰۰۸		
۸	۱/۴۲	۱/۳۸	۳/۱		۰/۰۰۲۰		

### بحث و نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده فرضیه اصلی از این کار را، که متغیرهای هیدرولیک به‌تنهایی برای توضیح پاسخ کانال به واقعه سیلاب شدید کافی نیست، تأیید کرد. گنجاندن عوامل دیگر از جمله پایداری جانبی، شیب کانال، درجه رسوب‌دهی، و درصد پوشش طول بازه با ساختارهای مصنوعی به مدل‌های رضایت‌بخشی برای توضیح تنوع مشاهده شده در درجه گسترش کانال منجر شده است. در بازه‌های کم‌شیب، که با شاخص پایداری جانبی بالاتری مشخص شدند، گسترش کانال عمدتاً از طریق فرسایش جانبی رخ داده است و همان‌طور که مشاهدات میدانی نیز تأیید کرد، فرایندهای رسوبی کمتر قابل توجه بود. در مقابل، در بازه‌های شیب‌دار درجه رسوب‌دهی در گسترش کانال تأثیرگذارتر بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که فرایند گسترش در اصل توسط دو عامل قدرت سیلاب و پایداری دره‌ای کنترل شده است. ذکر کردنی است مدت زمان سیل بالاتر از آستانه بحرانی (مثلاً، مربوط به حمل و نقل بار بستر) در تحلیل ما وارد نشده است، اما متغیری است که به احتمال بسیار زیاد می‌تواند نیرومندی مدل‌های رگرسیون در این بازه‌ها را افزایش دهد. متأسفانه،

اطلاعات آستانه برای حمل و نقل بار بستر در رودخانه‌های مورد مطالعه، همچنین توزیع اندازه دانه برای همه بازه‌های تجزیه و تحلیل شده در دسترس نبود. درجه گسترش کانال روابط نسبتاً خوبی را با پنج متغیر مهم توضیحی شامل پایداری جانی، درجه رسوب‌دهی، درصد طول عوارض انسانی با بازه‌های مورد مطالعه، و توان واحد جریان قبل و بعد از سیلاب را نشان داد.

تجزیه و تحلیل در سه زیرحوضه از حوضه رودخانه کنجانچم نشان داد که توان واحد جریان براساس عرض کانال قبل از سیلاب دارای روابط قوی‌تری با گسترش کانال در مقایسه با توان واحد جریان براساس عرض کانال پس از سیلاب و توان سطح مقطعی جریان است. نتایج این پژوهش یافته‌های سوریان و همکاران (۲۰۱۶)، ریگینی و همکاران (۲۰۱۷) و مورارو (۲۰۱۷) را تأیید می‌کند. سیلاب آبان‌ماه ۱۳۹۴ ایلام خسارت شدیدی به زیرساخت‌ها، جاده‌ها، و پل‌ها زد و با تلفات جانی نیز همراه بود. چنین اثرهای فاجعه‌باری از سیل به‌طور عمده منعکس‌کننده پویایی کانال است (به‌عنوان مثال، فرسایش، انباشتگی بستر، و کندن کانال). بنابراین، مستندسازی نوع و شدت پاسخ کانال برای شناسایی عوامل کنترل‌کننده پاسخ و در توسعه ابزاری که قادر به پیش‌بینی پویایی کانال باشد بسیار مهم است. به‌تازگی، بوراس و همکاران (۲۰۱۴) اظهار کردند که هنوز هم فقدان عمومی در توانایی پیش‌بینی تغییرات عمده ژئومورفولوژی در طول یک رویداد سیلاب شدید در محدوده موردنظر وجود دارد. در این رابطه، مدل‌های رگرسیون و دیگر نتایج این مطالعه می‌تواند برای پیش‌بینی میزان گسترش کانال از طریق تهیه نقشه خطر مورد استفاده قرار گیرد.

## منابع

- رستمی، س. (۱۳۸۷). ارزیابی فرسایش و رسوب‌زایی حوضه آبریز سد ایلام با نگاه ویژه به نقش سازندهای زمین‌شناسی منطقه در تولید رسوب، پایان‌نامه کارشناسی ارشد.
- شرکت آب منطقه‌ای استان ایلام.
- مقیم، ا. (۱۳۸۸). اکوزئومورفولوژی و حقوق رودخانه، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- مهدوی، م. (۱۳۹۱). هیدرولوژی کاربردی، ج ۲، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- Baker, V.R.; Kochel, R.C. and Patton, P.C. (1998). *Flood Geomorphology*, John Wiley and Sons, 528 P.
- Brierley, G.J. and Fryirs, K.A. (2005). *Geomorphology and River Management: Applications of the River Style Framework*, Blackwell, Oxford, p. 398.
- Buraas, E.M.; Renshaw, C.E.; Magilligan, F.J. and Dade, W.B. (2014). Impact of reach geometry on stream channel sensitivity to extreme floods, *Earth Surf. Process. Landf.*, 39: 1778-1789.
- Cenderelli, D.A. and Wohl, E.E. (2003). Flow hydraulics and geomorphic effects of glacial-lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal, *Earth Surf. Process. Landf.*, 28: 385-407.
- Costa, J.E. and O'Connor, J.E. (1995). Geomorphically effective floods. In: Costa, J.E., Miller, A.J., Potter, K.W. Wilcock, P. (Eds.), *Natural and Anthropogenic Influences in Fluvial Geomorphology Monograph 89*, American Geophysical Union, Washington, D.C., pp. 45-56.
- Dean, D.J. and Schmidt, J.C. (2013). The geomorphic effectiveness of a large ood on the Rio Grande in the Big Bend region: insights on geomorphic controls and post-flood geomorphic response, *Geomorphology*, 201: 183-198.
- Heritage, G.L.; Large, A.R.G.; Moon, B. P. and Jewitt, G. (2004). Channel hydraulics and geomorphic effects of an extreme flood event on the Sabie River, South Africa, *Catena*, 58, 151-181.
- Hooke, J.M. and Mant, J.M. (2000). Geomorphological impacts of a flood event on ephemeral channels in SE Spain, *Geomorphology*, 34(3-4): 163-180.
- Jansen, J.D. (2006). Flood magnitude–frequency and lithologic control on bedrock river incision in post-orogenic terrain, *Geomorphology*, 82: 39-57.
- Johnson, R.M. and Warburton, J. (2002). Flooding and geomorphic impacts in a mountain torrent: Raise Beck, central Lake District, England. *Earth Surf. Process. Landf.*, 27: 945-969.
- Kale, V.S. (2007). Geomorphic effectiveness of extraordinary floods on three large rivers of the Indian Peninsula, *Geomorphology*, 85: 306-316.
- Kale, V.S. and Hire, P.S. (2004). Effectiveness of monsoon floods on the Tapi River, India: role of channel geometry and hydrologic regime, *Geomorphology*, 57: 275-291.
- Krapesch, G.; Hauer, C. and Habersack, H. (2011). Scale orientated analysis of river width changes due to extreme flood hazard, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11: 2137-2147.
- Kumar, S.; Ranta, M.J.; Praveen, T.V. and Kumar, V. (2010). Analysis of the Runoff for Watershed Using SCS-CN Method and Geographic Information Systems, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2: 3947-3654.
- Langhammer, L. (2010). Analysis of the relationship between the stream regulations and the geomorphologic effects of floods, *Nat. Hazards*, 54: 121-139.
- Lenzi, M.A.; Mao, L. and Comiti, F. (2006). Effective discharge for sediment transport in a mountain river: computational approaches and geomorphic effectiveness, *J. Hydrol.*, 326: 257-276.

- Magilligan, F.J.; Buraas, E.M. and Renshaw, C.E. (2015). The efficacy of stream power and flow duration on geomorphic responses to catastrophic flooding, *Geomorphology*, 228: 175-188.
- Mahdavi, M. (2012). *Applied Hydrology*, Vol. 2, University of Tehran Press, 437 pages.
- Mishra, S.K.; Tyagi, J.V.; Singh, V.P. and Singh, R. (2006). SCS-CN-based Modeling of Sediment Yield, *Journal of Hydrology*, 324: 301-322.
- Moghimi, A. (2009). *River Eco-Geomorphology and Rights*, University of Tehran Press, 296 pages.
- Moraru, A. (2017). Streambank erosion and channel widening: implications for flood hazard. Master thesis, MSc in Mineral Resources and Geological Hazards, University of Barcelona.
- Nardi, L. and Rinaldi, M. (2015). Spatio-temporal patterns of channel changes in response to a major flood event: the case of the Magra River (central-northern Italy), *Earth Surf. Process. Landf.*, 40: 326-339.
- Phillips, J.D. (2002). Geomorphic impacts of flash flooding in a forested headwater basin, *J. Hydrol.*, 269: 236-250.
- Righini, M.; Surian, N.; Wohl, E.; Marchi, L.; Comiti, F.; Amponsah, W. and Borga, M. (2017). Geomorphic response to an extreme flood in two Mediterranean rivers (northeastern Sardinia, Italy): analysis of controlling factors, Accepted to *J. Geomorphology*.
- Rinaldi, M.; Surian, N.; Comiti, F. and Bussettini, M. (2013). A method for the assessment and analysis of the hydromorphological condition of Italian streams: the Morphological Quality Index (MQI), *Geomorphology*, 180-181: 96-108.
- Rinaldi, M.; Amponsah, W.; Benvenuti, M.; Borga, M.; Comiti, F.; Lucia, A.; Marchi, L.; Nardi, L.; Righini, M. and Surian, N. (2016). An Integrated Approach for Investigating Geomorphic Response to Extreme Events: Methodological Framework and Application to the October 2011 Flood in the Magra River Catchment. Italy, *Earth Surface Processes and Landforms* <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3902> (in press).
- Rostami, S. (2008). Estimation of erosion and sedimentation of Ilam Dam basin with special attention to the role of geological formations of the region in sediment production. Master's thesis, Science and Research Unit of Tehran, 134 pages.
- Surian, N.; Mao, L.; Giacomini, M. and Ziliani, L. (2009). Morphological effects of different channel forming discharges in a gravel-bed river, *Earth Surf. Process. Landf.*, 34: 1093-1107.
- Thompson, C. and Croke, J. (2013). Geomorphic effects, flood power, and channel competence of a catastrophic flood in confined and unconfined reaches of the upper Lockyer valley, southeast Queensland, Australia, *Geomorphology*, 197: 156-169.
- Tongbi, T.u.; Kara, J.; Ercan, A.; Trinh, T.; Kavvas, M. and Nosacka, J. (2017). Assessment of the effects of multiple extreme floods on flow and transport processes under competing flood protection and environmental management strategies, *Science of the Total Environment*, 607-608: 613-622.
- Wolman, M.G. and Miller, J.P. (1960). Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes, *J. Geol.*, 68: 54-74.