

## شبیه‌سازی سیلاب‌های رودخانه دره ائورت با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS در محیط GIS (محدوده مورد مطالعه: از روستای شورستان تا تلاقی رودخانه ارس)

ارسلان مهرورز- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی.  
عقیل مددی\* - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی.  
فریبا اسفندیاری درآباد- استاد ژئومورفولوژی دانشگاه محقق اردبیلی.  
مسعود رحیمی - دانش‌آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰      تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۱۲/۰۲

### چکیده

سیلاب‌ها از جمله فراوان‌ترین مخاطرات طبیعی می‌باشند که همه‌ساله خسارات جانی و مالی بسیاری را برای مردم به همراه دارند. مناطق مجاور رودخانه‌ها به دلیل بهره‌برداری از شرایط خاص اجتماعی و اقتصادی، همواره مورد دست‌اندازی به بستر و حریم رودخانه قرار گرفته‌اند که این عمل باعث شده خطرات ناشی از وقوع سیلاب‌ها در طی سال‌های اخیر افزایش یابد. رودخانه دره ائورت یکی از رودخانه‌های دائمی استان اردبیل می‌باشد که در طی سال‌های اخیر همواره با رخداد سیلاب‌های بزرگی مواجه بوده است. در این پژوهش سعی شده است خطر وقوع سیلاب در این رودخانه با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS در محیط GIS شبیه‌سازی شده و مورد بررسی قرار گیرد. داده‌های اصلی مورد نیاز برای این پژوهش شامل: نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۰۰۰، رودخانه دره ائورت، داده‌های هیدرومتری و شرایط مرزی رودخانه می‌باشد که از سازمان آب منطقه‌ای استان اردبیل تهیه گردید. بر اساس تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته و بررسی میدانی مشخص گردید که به دلیل دست‌اندازی‌های کشاورزان منطقه، تغییرات زیادی در عرض بستر فعال رودخانه اتفاق افتاده است. این عمل سبب تنگ‌شدگی مجرای رودخانه گردیده و باعث می‌شود جریان آب رودخانه از مجرای اصلی خارج شده و وارد محدوده‌ی دشت سیلابی گردد. خروجی نقشه پراکنش فضایی سیلاب‌های شبیه‌سازی شده در منطقه نشان داد پلهایی که سازه بتنی ندارند در سیلاب‌های با دوره بازگشت‌های ۲-۵-۱۰ ساله با احتمال تخریب روبه‌رو خواهند شد. همچنین در سیلاب‌های با دوره بازگشت‌های ۵۰-۱۰۰-۲۰۰ بسیاری از زمین‌های زراعی و روستاها در معرض خسارت قرار خواهند گرفت. تحلیل نتایج نشان می‌دهد در صورت وقوع سیلابی با دوره بازگشت ۲۵ سال حدود ۱۷۴۳ هکتار از اراضی دشت سیلابی به زیر آب خواهد رفت و خسارات بسیاری را برای کشاورزان به بار می‌آورد. همچنین حداکثر عرض پهنای سیل گیر برای سیلابی با دوره بازگشت ۲۵ سال در برخی قسمت‌های رودخانه به حدود ۸۹۶ متر خواهد رسید. بر این اساس لزوم توجه به آزادسازی اراضی بستر و حریم رودخانه دره ائورت جهت مدیریت صحیح دشت سیلابی این رودخانه بیش‌ازپیش احساس می‌شود.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی سیلاب، مدل HEC-RAS، دشت سیلابی، تنگ‌شدگی مجرای رودخانه دره ائورت.

## مقدمه

سیلاب‌ها از خطرناک‌ترین مخاطرات طبیعی به شمار می‌آیند که باعث به وجود آمدن نگرانی‌های بسیاری در سطح جهان شده‌اند (جاها و همکاران، ۲۰۱۲). سیلاب‌ها در سال‌های اخیر به یک فاجعه طبیعی در سطح جهانی تبدیل شده‌اند که ۴۷ درصد از بلایای طبیعی را در برمی‌گیرد (UNISDR, 2015). از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵، ۱۵۰۰۶۱ مورد سیل در سطح جهان رخ داده است و بر اساس اطلاعات مربوط به دفتر سازمان ملل برای کاهش خطر در برابر بلای طبیعی (UNISDR)، سیلاب‌ها باعث ۱۱/۱ درصد از مرگ‌ومیرها در سطح جهان شده است (هانگ<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۸). سیلاب‌ها عموماً به‌عنوان پدیده‌های کاتاستروفیک<sup>۳</sup> شناخته می‌شوند که در طی دهه‌های اخیر نه تنها باعث کشته شدن صدها هزار انسان در سرتاسر دنیا شده، بلکه زندگی یک و نیم میلیارد انسان دیگر را تحت تأثیر قرار داده‌اند (مارچی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۰). یک سیل هنگامی رخ می‌دهد که جریان آب از محدوده بستر خود خارج شود و مناطق اطراف آن را در برگیرد. به خاطر قرارگیری بسیاری از جوامع شهری و روستایی در نزدیکی رودخانه‌ها، سیلاب‌ها به‌عنوان یک تهدید بزرگ در سراسر جهان به شمار می‌آیند. دشت‌های سیلابی و مناطق مجاور رودخانه به دلیل بهره‌برداری از شرایط خاص اجتماعی و اقتصادی، همواره مورد توجه افراد قرار گرفته است (اظهر<sup>۵</sup>، ۲۰۱۷). به دلیل افزایش فزاینده جمعیت شهری و روستایی، تقاضا برای ساخت‌وساز در حاشیه رودخانه‌ها بیشتر شده و باعث تجاوز به محدوده بستر و حریم رودخانه گردیده است. از طرفی نیز پراکنش بارش از لحاظ زمانی و مکانی در محدوده مناطق خشک و نیمه‌خشک، باعث ایجاد سیلاب‌های مخرب و خسارت‌های فراوان مالی و جانی شده است (نصرتی<sup>۶</sup>، ۱۳۷۹). در این میان نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب برای دوره‌های بازگشت مختلف یکی از متداول‌ترین ابزارهای می‌باشد که برای نمایش پتانسیل مخاطرات در دشت‌های سیلابی مورد استفاده قرار می‌گیرد (بیتز<sup>۶</sup>، ۲۰۰۴). تهیه نقشه‌های مناطق مستعد سیلاب یک ابزار مدیریتی مناسب برای شناسایی مناطق در معرض خطر به حساب می‌آید (تهرانی<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). در واقع اولین گام در طرح‌های مدیریتی دشت‌های سیلابی تهیه نقشه پهنه‌بندی سیل است. از موارد کاربرد این نقشه‌ها می‌توان به تعیین بستر و حریم رودخانه‌ها، مطالعه و توجیه اقتصادی طرح‌های عمرانی، پیش‌بینی و هشدار سیل، عملیات امداد و نجات و بیمه سیل اشاره نمود (یمانی و همکاران، ۱۳۹۱). از کاربردهای مهم دیگر تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب در اقدامات مقابله با سیل، می‌توان به مواردی چون: تدوین طرح مقابله اضطراری با سیل، مشخص کردن اراضی سیل‌گیر در سامانه هشدار سیلاب، کمک‌رسانی و تخلیه در خطر سیلاب، اشاره کرد (راهنمای پهنه‌بندی سیل و تعیین حد بستر و حریم رودخانه، ۱۳۸۴). جهت تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب روش‌های متفاوتی وجود دارد. یکی از این روش‌های جدید، تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) با مدل‌های هیدرولیکی می‌باشد. از این‌رو، تحلیل داده‌های هیدرولیکی رودخانه با استفاده از مدل HEC-RAS و نیز تلفیق آن با الحاقی HEC-GeoRAS جهت انجام فرایندهای پیش‌پردازش و نیز پس پردازش داده‌ها، می‌تواند شبیه‌سازی مناسبی از پراکنش فضایی سیلاب‌ها برای دوره‌های بازگشت مختلف ارائه دهد. به‌منظور پهنه‌بندی سیلاب با استفاده از HEC-RAS پژوهش‌های فراوانی صورت گرفته است که می‌توان به‌عنوان مثال به پژوهش‌های زیر اشاره کرد: ایسوب<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیقی به تجزیه و تحلیل خطر سیلاب با استفاده از مدل HEC-RAS پرداختند. آن‌ها در این تحقیق جهت

1 Jha

۲ Hong et al

3 Catastrophic phenomena

4 Marchi

5 Azhar

6 Bates

۷ Tehrani et al

8 Iosub

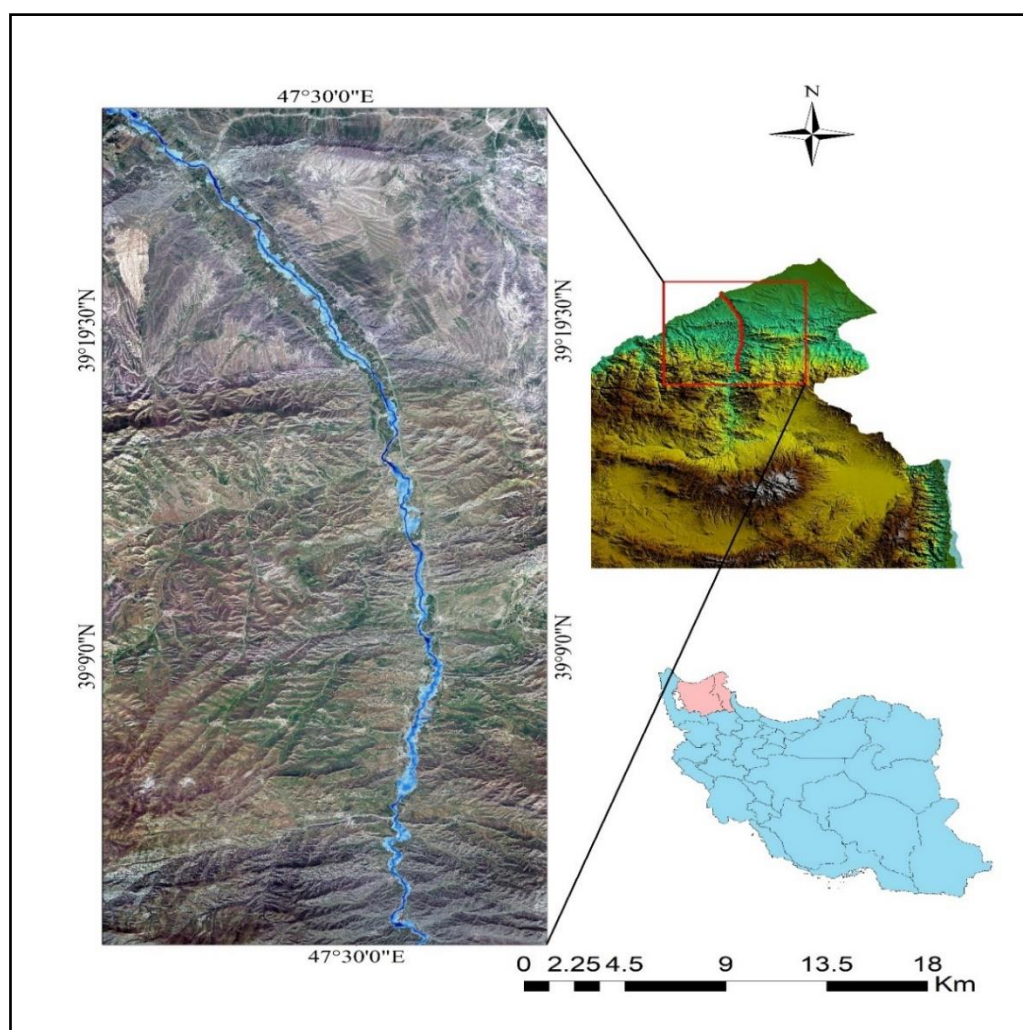
بررسی سیلاب‌های حوضه اوزنا<sup>۱</sup> از الحاقی HEC-GeoRAS استفاده کردند. نتایج تحقیق این پژوهشگران نشان‌دهنده ریسک بالای سیلاب در این حوضه می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی سیلاب این رودخانه نشان داده که با رخداد سیلاب در محدوده مورد مطالعه حدود ۱۴۷ ساختمان واقع در اطراف رودخانه با مخاطره مواجه خواهند بود. مارتین<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیقی به کاربرد مدل HEC-RAS و ابزار الحاقی آن در GIS جهت تهیه نقشه شبیه‌سازی سیلاب پرداختند. آن‌ها در این تحقیق به شبیه‌سازی سیلاب برای دوره‌های بازگشت ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ ساله پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در اثر رخداد سیلابی با دوره بازگشت ۵۰ ساله، اکثر روستاهای اطراف رودخانه سیرونکو<sup>۳</sup> با مخاطره سیلاب مواجه خواهند شد. ختتاک<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی به تهیه نقشه پهنه‌های سیلابی رودخانه کابل<sup>۵</sup> با استفاده از مدل HEC-RAS در محیط GIS پرداختند. آن‌ها از طریق نقشه‌های پهنه‌های سیلابی به شناسایی مناطق تحت تأثیر مخاطره سیلابی این رودخانه پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد، بیشترین محدوده‌ی تحت تأثیر مخاطره سیلاب زمین‌های کشاورزی اطراف رودخانه می‌باشد. مقایسه شبیه‌سازی سیلاب انجام‌شده با نقشه‌های سیلاب به‌دست‌آمده از تصاویر MODIS نشان‌دهنده دقت بالای خروجی به‌دست‌آمده آن‌ها می‌باشد. یمانی و همکاران (۱۳۹۱) پژوهشی بر روی پهنه‌های سیل گیر بالادست رودخانه طالقان با استفاده از مدل HEC-RAS انجام داده‌اند. محققان در این تحقیق، سطوح سیل گیر در دوره بازگشت‌های ۲ تا ۲۰۰ ساله به طول ۶/۵ کیلومتر از بستر رودخانه طالقان مورد مطالعه قراردادند. نتایج آن‌ها نشان داد که از کل مساحت تحت پوشش سیل ۲۰۰ ساله، حدود ۸۸/۱۶ درصد مستعد سیل‌گیری توسط سیل‌های ۲۵ سال و کمتر از آن است. رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهشی با عنوان بررسی تغییر مورفولوژی بستر رودخانه پیش و پس از احداث سد با استفاده از HEC-RAS و GIS بر روی پایین‌دست سد ستارخان پرداخته‌اند. آن‌ها برای محاسبه تغییرات بستر از داده‌های دبی و رسوب در بازه زمانی قبل و بعد از احداث سد بهره برده‌اند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که میزان رسوب و جابجایی عرضی رودخانه بعد احداث سد به علت دبی تقریباً ثابت و حالت پایدارتری را دارد. روشن و همکاران (۱۳۹۲) طی مطالعه‌ای به شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی رودخانه بشار استان کهگیلویه و بویراحمد با استفاده از مدل HEC-RAS در محیط Arc GIS پرداخته‌اند. در این تحقیق شرایط هیدرولیکی رودخانه‌ی بشار برای دو حالت شرایط موجود و طبیعی برای سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف شبیه‌سازی شد. نتایج تحقیق این محققان نشان داد که شبیه‌سازی عرضی مقاطع و به‌خصوص پروفیل طولی سیل‌گیری رودخانه حاکی از افزایش سطح سیلاب بوده و علت کاهش سطح سیلاب در برخی مقاطع یا به دلیل وجود موانع بوده و یا به دلیل تنگ‌شدگی مقاطع می‌باشد که در این صورت سطح سیلاب کاهش و بر عمق آب‌گرفتگی افزوده می‌شود. رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۷) در تحقیقی به پهنه‌بندی سیلاب‌های رودخانه قره‌سو با استفاده از مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که با رخداد سیلابی با دوره بازگشت ۲۵ سال، مساحتی در حدود ۱۰۸۵ هکتار از اراضی کشاورزی و باغات حاشیه رودخانه قره‌سو به زیرآب رفته و خساراتی را برای کشاورزان این منطقه به وجود خواهد آورد. آن‌ها همچنین نشان دادند که عرض پهنای سیل گیر برای دوره بازگشت ۲۵ سال در بازه‌های دوم، سوم و چهارم تا ۵۰۰ متر نیز می‌رسد. رودخانه دره ائورت یکی از رودخانه‌ای دائمی استان اردبیل می‌باشد که در طی سال‌های اخیر همواره با رخداد سیلاب‌های بزرگی مواجه بوده است. مطالعه مخاطرات سیلابی این رودخانه و تهیه نقشه پهنه‌های سیل گیر آن می‌تواند کمک شایانی به کاهش خسارات احتمالی در آینده کند. تحقیق حاضر خطر وقوع سیلاب را در محدوده‌ای به طول ۷۰ کیلومتر از رودخانه

<sup>۱</sup> Ozana<sup>۲</sup> Martin<sup>۳</sup> Sironko<sup>۴</sup> Khattak<sup>۵</sup> Kabul

دره ائورت (از روستای شورستان تا محل تلاقی رودخانه ارس) برای دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق پس از شبیه‌سازی جریان رودخانه در محیط نرم‌افزاری HEC-RAS خروجی این نرم‌افزار وارد نرم‌افزار Arc GIS شده و نقشه‌های دقیق پهنه‌های سیل گیر برای دوره‌های بازگشت مختلف در این نرم‌افزار ترسیم می‌شود.

### منطقه مورد مطالعه

رودخانه دره ائورت در شمال غرب ایران و شمال استان اردبیل واقع شده است. این رودخانه از دو سرشاخه بزرگ اهر چای و قره‌سو تشکیل شده است. رودخانه دره ائورت مهم‌ترین رودخانه واقع در حوضه آبریز رودخانه ارس بوده و مسیر کلی حرکت این رودخانه از جنوب به سمت شمال است. این رودخانه پس از طی مسیر ۱۳۶ کیلومتری در پایین دست سد میل و مغان به رودخانه مرزی ارس ملحق می‌شود. از روستاهای مجاور رودخانه می‌توان به روستاهای سیرک، کندالی، ولی دالی، دیک داش و بران سفلا اشاره کرد. بازه مطالعاتی در این تحقیق، حدفاصل روستای شورستان تا محل تلاقی رودخانه ارس به طول تقریبی ۷۰ کیلومتر می‌باشد. شکل (۱) موقعیت منطقه مورد را نشان می‌دهد. از نظر موقعیت ریاضی، منطقه مورد مطالعه در بین عرض‌های ۵۶' ۰۰" ۳۹° تا ۱۴' ۲۸" ۳۹° شمالی و طول‌های ۱۳" ۱۹' ۴۷° تا ۲۱" ۳۹' ۴۷° شرقی واقع شده است.



شکل ۱: موقعیت محدوده‌ی مورد مطالعه در شمال غرب ایران

## مواد و روش‌ها

نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۰۰۰، داده‌های هیدرومتری و شرایط مرزی از اساسی‌ترین داده تحقیق حاضر محسوب می‌گردد که از سازمان آب منطقه‌ای استان اردبیل تهیه گردید. همچنین جهت تهیه و آماده‌سازی لایه‌ها و اجرای مدل تحقیق از نرم‌افزارهای Arc GIS، HEC-RAS، ENVI، SMADA، SAS.Planet و الحاقی<sup>۱</sup> HEC-GeoRAS استفاده شده است.

## مدل HEC-RAS

مدل HEC-RAS به منظور انجام محاسبات هیدرولیکی یک‌بعدی برای شبکه کاملی از مجاری طبیعی و کانال‌های مصنوعی طراحی شده است. این مدل توسط مرکز مهندسی هیدرولیک<sup>۲</sup> (HEC) بخش مهندسی ارتش ایالات متحده آمریکا (USACE) توسعه یافته است. این مدل می‌تواند در جریان زیربحرانی<sup>۳</sup>، فوق بحرانی<sup>۴</sup> و جریان ترکیبی<sup>۵</sup>، پارامترهای هیدرولیکی و پروفیل سطح آب را محاسبه کند. مدل HEC-RAS دارای چهار فاکتور تحلیل تک‌بعدی رودخانه هست که شامل ۱- محاسبه پروفیل سطح آب جریان ماندگار ۲- شبیه‌سازی جریان غیر ماندگار ۳- محاسبات انتقال رسوب مرزی متحرک ۴- تحلیل کیفیت آب است (مرکز مهندسی هیدرولیک، ۲۰۱۰).

## اجرای مدل HEC-RAS

برای اجرای مدل HEC-RAS در این تحقیق نیاز به داده‌های هندسی و جریان پایدار است که شامل ضرایب افت انرژی، تعیین محدوده عرضی بستر اصلی مجرا، هندسه مقطع عرضی و تعیین پیوستگی پلان رودخانه و داده‌های جریان شامل موارد اطلاعات دبی جریان، تعیین نقاط کنترل و شرایط مرزی هست. منظور از شرایط مرزی ورودی و خروجی جریان در پایین و بالای رودخانه مورد مطالعه است. برای انجام محاسبات هیدرولیکی با استفاده از مدل HEC-RAS ابتدا مقاطع عرضی باید تعریف شود که برای این کار در محیط نرم‌افزار Arc Map لایه مورد نظر TIN تهیه می‌گردد. پس از تشکیل لایه TIN لایه‌های مختلفی همچون لایه خط مرکزی جریان، لایه خطوط کناری رودخانه، لایه محدوده جریان و لایه مقاطع عرضی ترسیم و پس از پردازش توسط نرم‌افزار Arc Map آماده استخراج برای کار مدل هیدرولیکی-HEC-RAS می‌شود. مدل HEC-RAS محاسبات پروفیل سطح آب را برای جریان پایدار متغیر تدریجی در رودخانه‌ها و کانال‌های مصنوعی در رژیم‌های جریان زیربحرانی، فوق بحرانی و مختلط می‌تواند انجام دهد. محاسبه پروفیل سطح آب با شروع از یک مقطع عرضی به طرف مقاطع دیگر به وسیله حل معادله انرژی به روش استاندارد گام‌به‌گام انجام می‌شود (رحیمی، ۱۳۹۶). معادله انرژی به صورت زیر است:

$$Z_1 + Y_1 + a \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + a \frac{V_2^2}{2g} + h_e \quad \text{رابطه (۱)}$$

$Z$  = ارتفاع بستر،  $Y$  = عمق آب،  $V$  = سرعت متوسط،  $\alpha$  = ضریب تصحیح بار سرعت،  $h_e$  = افت انرژی کل،  $g$  = شتاب ثقل.

در شکل (۲) نمایش گرافیکی مؤلفه‌های معادله انرژی نشان داده شده است.

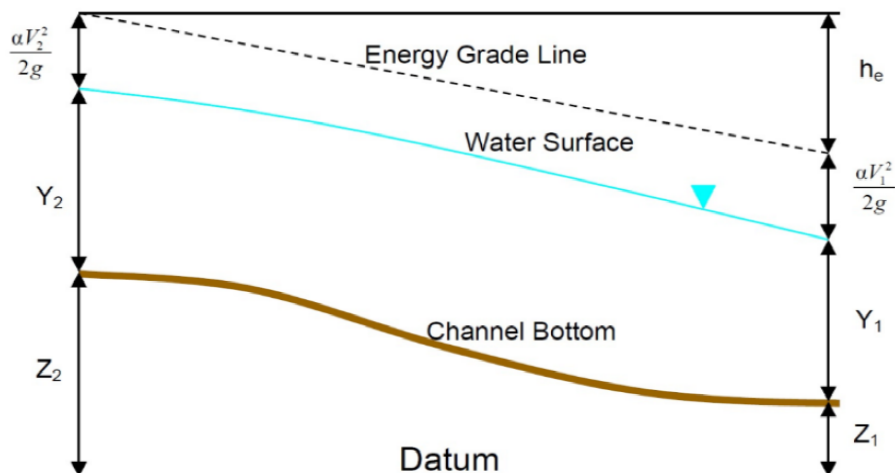
<sup>۱</sup> Extension

<sup>۲</sup> Hydrologic Engineering Center

<sup>۳</sup> Subcritical flow

<sup>۴</sup> Supercritical flow

<sup>۵</sup> Mixed flow

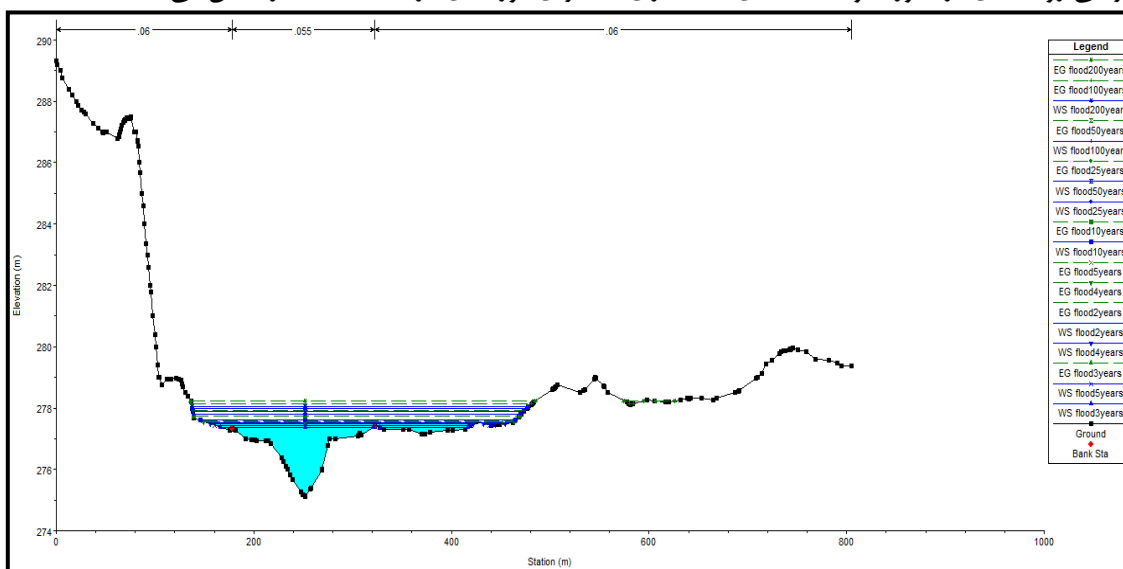


شکل ۲. نمایش گرافیکی معادله انرژی

معادله مونتوم موجود در مدل HEC-RAS به صورت زیر محاسبه می‌شود (برونر<sup>۱</sup>، ۲۰۱۰: ۲۷):

$$\frac{Q_2^2 \beta_2}{gA_2} + A_2 \bar{y}_2 + \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) LS_0 - \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) LS_f = \frac{Q_1^2 \beta_1}{gA_1} + A_1 \bar{y}_1 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$\beta$  = ضریب تصحیح مونتوم،  $\bar{y}$  = عمق اندازه‌گیری شده از سطح آب تا مرکز ثقل سطح مقطع جریان،  $A$  = مساحت منطقه‌ی مرطوب زیر مقطع عرضی،  $S$  = شیب کانال،  $L$  = فاصله بین مقاطع،  $Q$  = جریان دبی. شکل (۳) نمونه‌ای از پروفیل عرضی رودخانه‌ی دره ائورت و سیلاب‌های شبیه‌سازی شده برای دوره‌های بازگشت مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۳. نمونه‌ای از پروفیل عرضی رودخانه و سطوح سیلابی شبیه‌سازی شده در مدل HEC-RAS

### بحث و نتایج

مدل‌های پخش سیلاب ابزار مفیدی برای مدیریت دشت سیلابی هستند. این توانایی در پیش‌بینی سیلاب در کاهش پتانسیل خسارت سیلاب به صورت حفاظت از کاربری‌های اراضی اطراف رودخانه، بالا بردن سطح آگاهی مردمان ساکن در اطراف دشت سیلابی و جلوگیری از ساخت‌وسازها در محدوده ممنوعه دشت سیلابی بسیار مفید بوده است (دی

<sup>1</sup> Brunner

بالدسار<sup>۱</sup> (۲۰۱۲). انتخاب ضریب زبری در مطالعات سیلاب و رفتار هیدرولیکی رودخانه نقش بسیار مهمی دارد. ضریب زبری<sup>۲</sup> در این تحقیق با استفاده از جدول کاون<sup>۳</sup> که خلاصه‌شده روش SCS می‌باشد به صورت فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$N = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m$$

رابطه (۳)

طبق بررسی‌های انجام‌شده و مشاهده میدانی ضریب مقاومت رودخانه دره ائورت در مجرای اصلی ۰/۰۵۵ در ساحل چپ ۰/۰۵۱ و در ساحل راست نیز ۰/۰۵۱ محاسبه گردید. داده‌های مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری از شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل تهیه گردید. پس از آماده کردن دبی حداکثر لحظه‌ای سالانه، با استفاده از نرم‌افزار SMADA توزیع لوگ پیرسون تیپ ۳ به لگاریتم مبنای ۱۰ بر دبی‌های پیک برآزش داده شد و حداکثر دبی لحظه‌ای برای دوره‌های بازگشت مختلف محاسبه گردید. دبی جریان سیلاب با دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله رودخانه دره ائورت در جدول (۱) نمایش داده شده است. رودخانه دره ائورت به علت طولانی بودن (۷۰ کیلومتر) مسیر رودخانه و اضافه شدن آبراهه‌های متعدد، به ۵ بازه تقسیم‌بندی شد. نوع جریان در رودخانه‌ها به‌طور کلی ممکن است زیربحرانی<sup>۴</sup>، فوق بحرانی<sup>۵</sup> و یا مختلط<sup>۶</sup> باشد. در رودخانه‌های کوهستانی معمولاً جریان فوق بحرانی و در رودخانه‌های سیلاب‌دشتی نوع جریان زیربحرانی می‌باشد (یاسی، ۱۳۹۴). با توجه به این که رودخانه دره ائورت در بازه مورد مطالعه هم در محدوده واحد کوهستان و هم در محدوده دشت سیلابی جریان دارد، نوع جریان برای رودخانه مختلط در نظر گرفته شد. اشکال (۴) و (۵) پراکنش فضایی سیلاب‌های شبیه‌سازی رودخانه دره ائورت را نشان می‌دهند.

جدول ۱: مقدار دبی‌های سیلابی رودخانه دره ائورت با دوره‌های بازگشت مختلف

مسیر مورد مطالعه	سیلاب با دوره بازگشت مختلف به مترمکعب در ثانیه						
	۲ ساله	۵ ساله	۱۰ ساله	۲۵ ساله	۵۰ ساله	۱۰۰ ساله	۲۰۰ ساله
سد عمارت	۱۳۷	۲۰۷	۲۶۶	۳۶۱	۴۳۲	۵۰۷	۵۸۴
۲۷ کیلومتر	۱۳۹	۲۰۹	۲۶۹	۳۶۵	۴۳۸	۵۱۲	۵۸۹
۳۷ کیلومتر	۱۴۲	۲۱۴	۲۷۵	۳۷۳	۴۴۸	۵۲۵	۶۰۴
ایستگاه بران	۱۴۴	۲۱۵	۲۷۸	۳۷۸	۴۵۳	۵۳۱	۶۱۲
۵۷ کیلومتر	۱۴۴	۲۱۷	۲۷۹	۳۷۸	۴۵۴	۵۳۶	۶۱۲

۱ Di Baldassarre

2 Roughness Coefficients

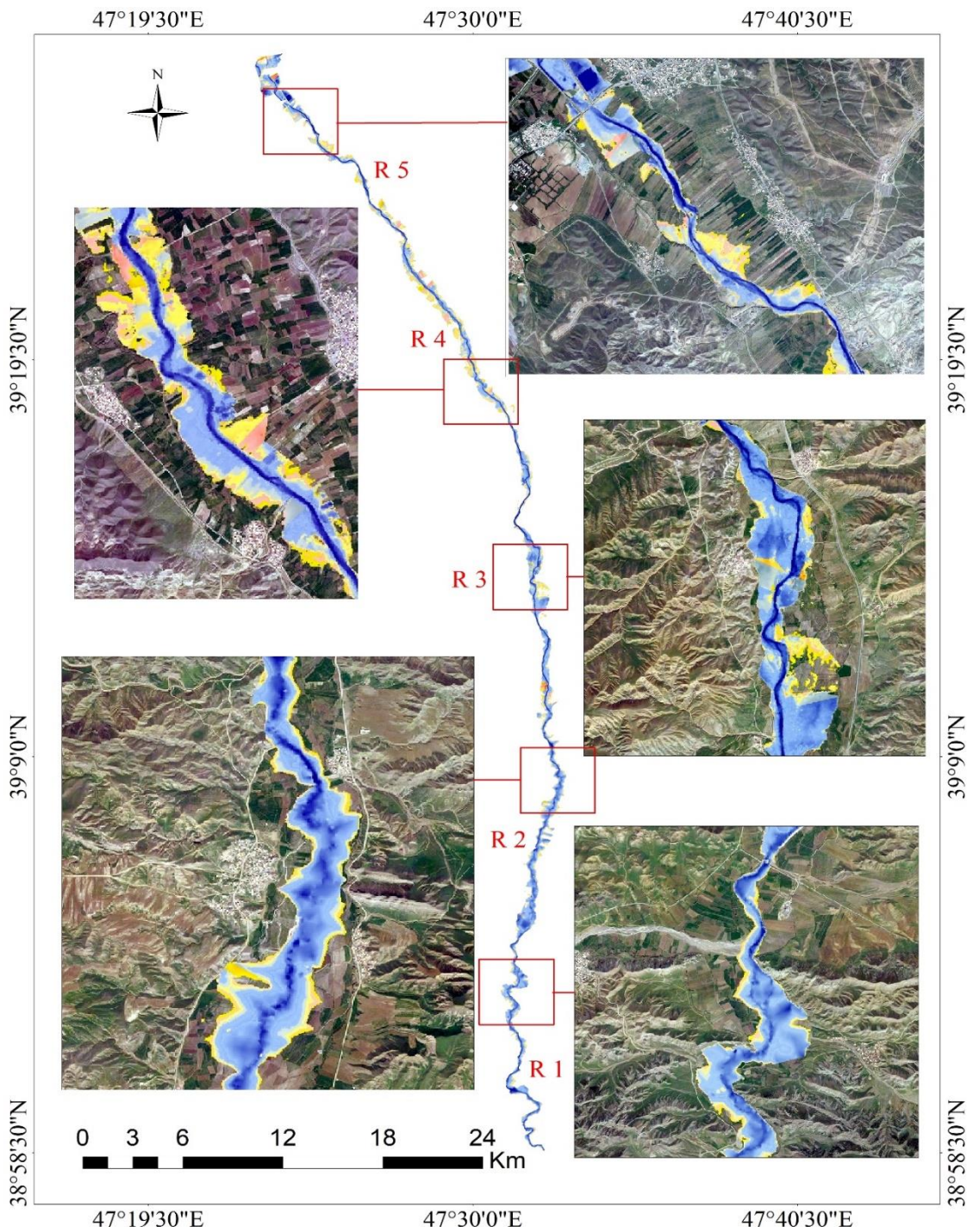
۳ Cowan

4 Sub Critical

5 Super Critical

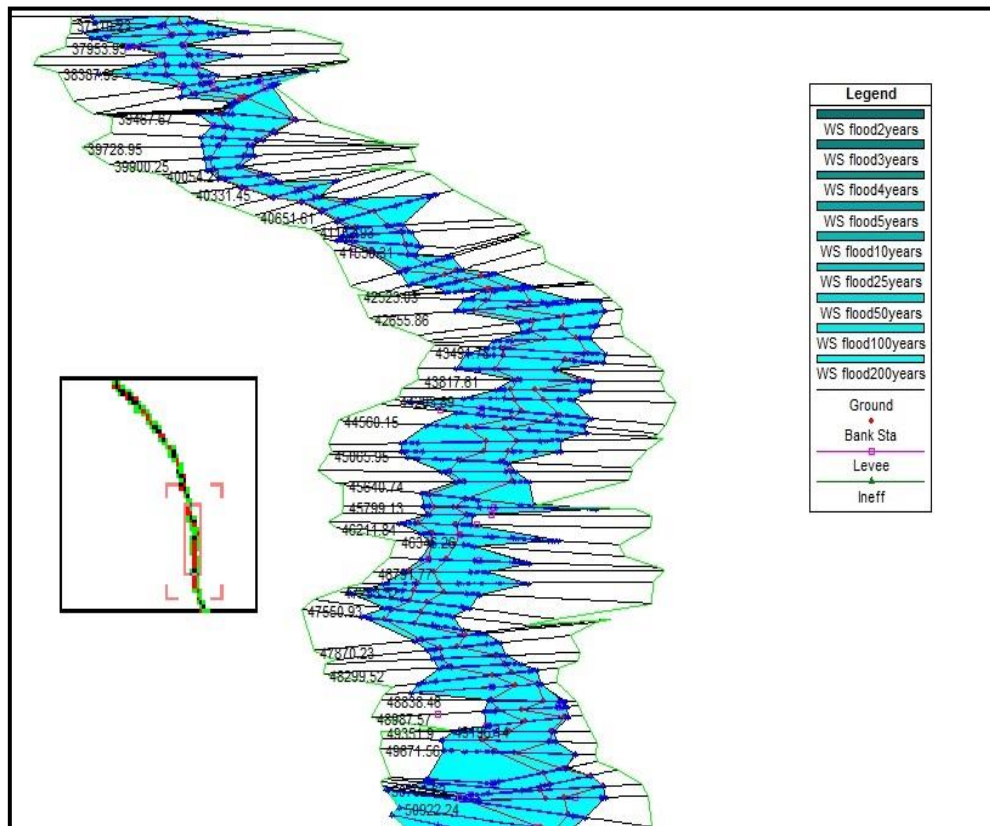
6 Mixed





شکل ۴: شبیه‌سازی سیلاب‌های رودخانه دره ائورت به تفکیک ۵ بازه مورد مطالعه

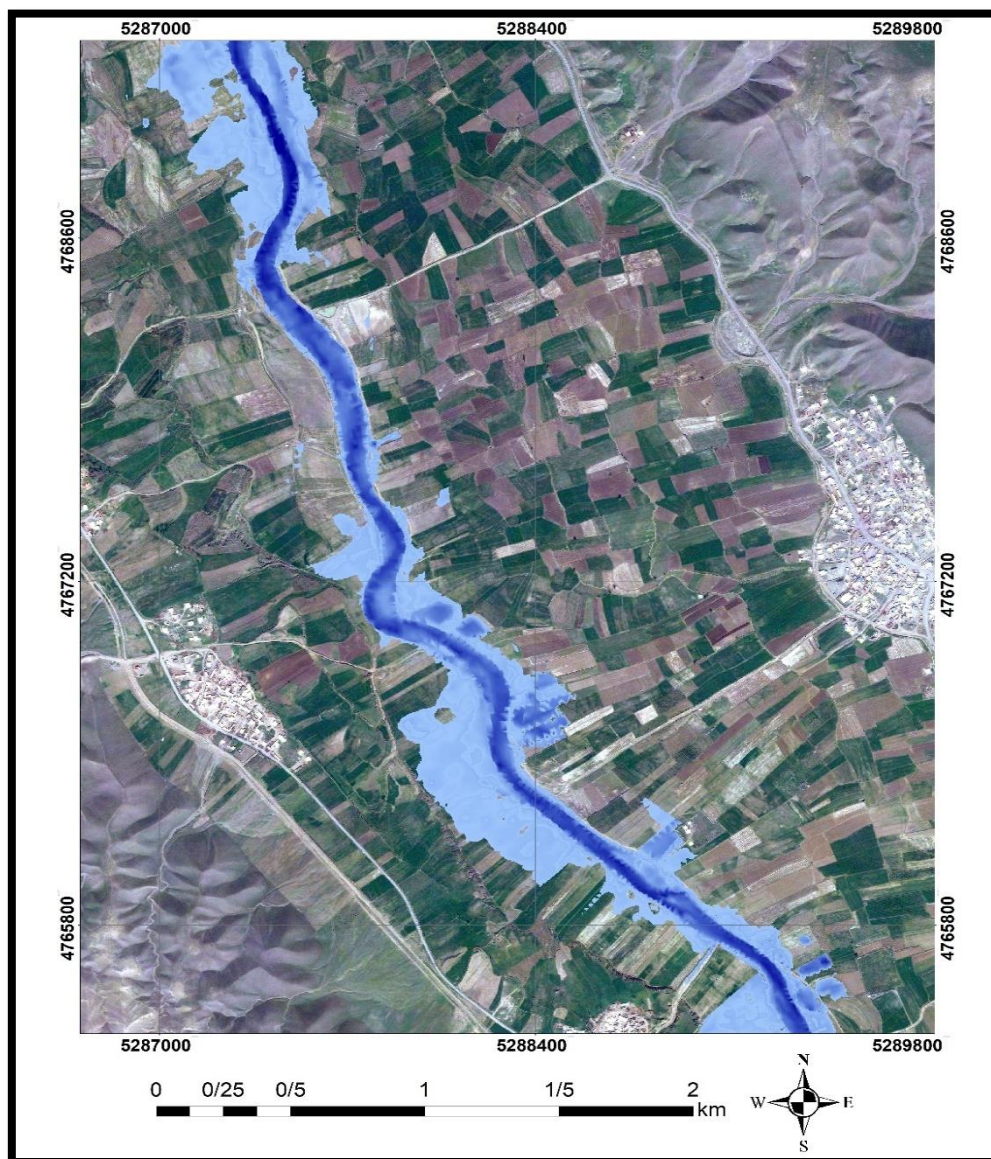




شکل ۵: شبیه‌سازی سیلاب رودخانه دره ائورت برای دوره‌های بازگشت مختلف در محیط نرم‌افزار HEC-RAS

#### شبیه‌سازی سیلاب با دوره‌های بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ ساله

دبی سالانه رودخانه دره ائورت با بازگشت ۲ ساله در نزدیکی سد عمارت بالغ بر ۱۳۷ مترمکعب بر ثانیه و در پایین دست ۱۴۴ مترمکعب بوده است. تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که سازه‌ها و پل‌هایی که غیر مهندسی می‌باشند، نمی‌توانند جریان سیلاب با دوره بازگشت ۱۰ ساله را کاملاً از خود عبور دهند و احتمال تخریب و آسیب زدن به این پل‌ها وجود دارد. همچنین در بخش بالایی رودخانه، سیلاب بیشتر در اطراف رودخانه نفوذ می‌کند ولی در قسمتی که رودخانه عمق زیاد دارد در مسیر اصلی مجرای خود جریان پیدا کرده است. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود در بالادست دبی جریان ۲۰۷ مترمکعب و در پایین دست یعنی ۵۷ کیلومتر از شروع محدوده مورد مطالعه به ۲۱۷ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد. تغییرات عمق آب معمولاً بین ۱/۵ الی ۳/۵ متر است و سرعت جریان در محدوده ۵/ تا ۲/۵ متر در ثانیه است. توان رودخانه در این دوره امکان تخریب این سازه‌ها رو افزایش می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که بعد از ۱۰ کیلومتری سد عمارت، اراضی زیر کشت رفته اطراف رودخانه دره ائورت به زیر سیلاب می‌رود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان سیلاب با دوره‌های بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ ساله در شکل (۶) نمایش داده شده است.



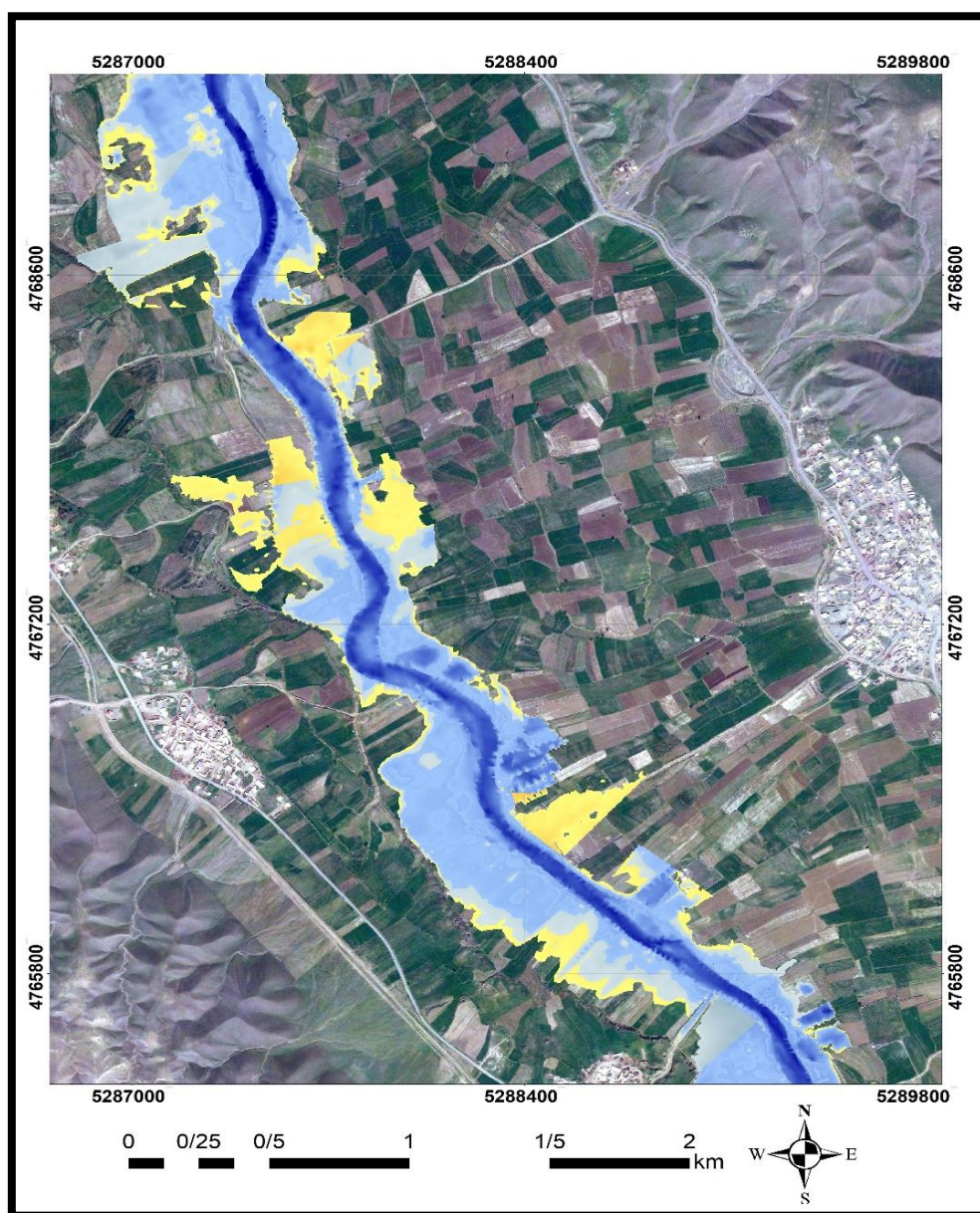
شکل ۶: شبیه‌سازی جریان سیلاب با دوره‌های بازگشت ۲، ۵ و ۱۰ ساله در نزدیکی روستای بران (بازه ۴)

#### شبیه‌سازی سیلاب با دوره‌های بازگشت ۲۵ و ۵۰ ساله

دبی سیلاب برای دوره بازگشت ۲۵ ساله در نزدیکی سد عمارت ۳۶۱ و نزدیکی ایستگاه بران به ۳۷۸ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نرم‌افزار HEC-RAS نشان می‌دهد که بخش فراوانی از اراضی بستر غیرفعال رودخانه طی دوره بازگشت ۲۵ ساله دوره به زیرآب می‌رود. همچنین در ابتدای محدوده بازه مطالعاتی، آب سیلاب تا نزدیکی‌های روستاها می‌رسد. دامنه تغییرات عمق آب بین ۱/۵ تا ۳/۵ متغیر است. دبی رودخانه در دوره بازگشت ۵۰ ساله در نزدیکی سد عمارت ۴۳۲ و در پایین‌دست رودخانه به ۴۵۴ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد. نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی نشان می‌دهد که پل‌های روستاهای تولان، شورستان، کچی قشلاقی که عموماً سازه‌های ضعیف هستند دوره بازگشت ۵۰ ساله را نمی‌توانند عبور دهند و احتمال تخریب این پل‌ها زیاد می‌باشد. همچنین نقشه پهنه‌های سیلابی نشان می‌دهد که طی سیلابی با دوره بازگشت ۵۰ ساله اراضی غیرفعال کاملاً به زیرآب می‌رود و این پدیده از محدوده ۱۰ کیلومتر از شروع بازه



مطالعاتی تا نزدیکی روستای بران شدت بیشتری دارد. همچنین دامنه تغییرات آب بین ۱/۵ تا ۴ متر می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان سیلاب با دوره‌های بازگشت ۲۵ و ۵۰ ساله در شکل (۷) نمایش داده شده است.

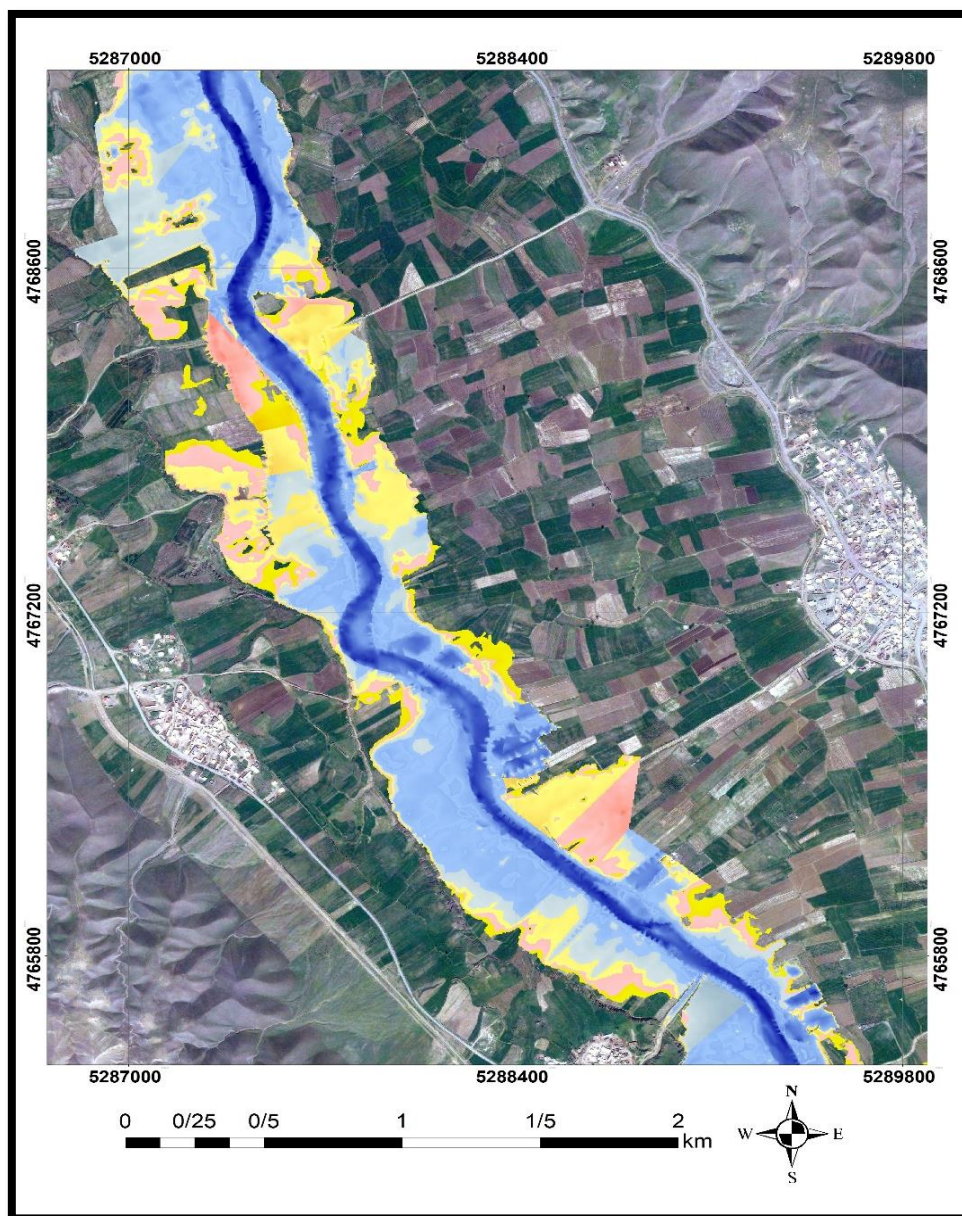


شکل ۷: شبیه‌سازی جریان سیلاب با دوره‌های بازگشت ۲۵ و ۵۰ ساله در نزدیکی روستای بران (بازه ۴)

#### شبیه‌سازی سیلاب با دوره‌های بازگشت ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله

دبی با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله در محدوده بالادست رودخانه ۵۰۷ و در محدوده پایین دست ۵۳۶ مترمکعب بر ثانیه است. تغییرات عمق آب بیشتر در محدوده ۳۰ کیلومتری از بازه مورد مطالعه می‌باشد که علت آن مربوط به برداشت مصالح بوده که در ادامه سبب حفر بستر رودخانه گردیده است. دامنه تغییرات عمق آب بین ۱/۵ تا ۴ متر است. غرقاب شدن زمین‌های کشاورزی از محدوده روستای دلیک یاراقان تا روستای آقا محمد بیگلو وسعت بیشتری دارد و خسارت فراوانی را به بار می‌آورد. دبی سالانه با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله در طول رودخانه در بالادست ۵۸۴ و در پایین دست ۶۱۲ مترمکعب بر ثانیه

متغیر است. دامنه تغییر عمق آب مثل دوره ۱۰۰ ساله است. نتایج شبیه‌سازی سیلاب برای دوره بازگشت ۲۰۰ ساله نشان می‌دهد که قسمت اعظم دشت سیلابی رودخانه دره ائورت در معرض سیلاب می‌باشند و بسیاری از اطراف روستاهای بالادست تا روستای بران در خطر مواجه با سیلاب قرار دارند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان سیلاب با دوره‌های بازگشت ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله در شکل (۸) نمایش داده شده است.



شکل ۸: شبیه‌سازی جریان سیلاب با دوره‌های بازگشت ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله در نزدیکی روستای بران (بازه ۴)

همچنین نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که خطرات عمده سیلاب‌های رودخانه دره ائورت، بیشتر متوجه اراضی کشاورزی و باغات محدوده دشت سیلابی می‌باشد. برای نمونه با سیلابی با دوره بازگشت ۱۰، ۲۵ و ۱۰۰ ساله به ترتیب حدود ۱۴۹۳، ۱۷۴۳ و ۲۱۰۳ هکتار از اراضی کشاورزی و باغات حاشیه رودخانه به زیرآب رفته و خسارات گسترده‌ای را برای کشاورزان این منطقه به بار خواهد آورد. همچنین بیشترین عرض پهنای سیل گیر در محدوده مورد مطالعه برای دوره بازگشت ۲۵



ساله نزدیک ۸۹۶ متر و برای دوره بازگشت ۲۰۰ ساله ۹۵۶ متر محاسبه شد. ورود کشاورزان به محدوده بستر و حریم رودخانه دره ائورت به کرات در طی مطالعات میدانی قابل مشاهده است. دست‌اندازی کشاورزان در این محدوده سبب تنگ‌تر شدن مجرای<sup>۱</sup> رودخانه در طی سال‌های اخیر شده است. این عامل در ادامه با کانالیزه کردن<sup>۲</sup> جریان عبوری آب از رودخانه سبب افزایش ریسک مخاطره سیلابی خواهد شد. در واقع در صورت بروز رخداد سیلابی با دوره بازگشت ۲۵ ساله و بیشتر از آن، جریان آب رودخانه دره ائورت از محدوده مجرا خارج شده و وارد محدوده دشت سیلابی آن خواهد شد که این امر می‌تواند سبب تخریب بخش عظیمی از اراضی کشاورزی شده و خسارات مالی بسیاری را برای ساکنین اطراف رودخانه به بار آورد.



شکل ۹: نمونه‌ای از فعالیت‌های کشاورزی و باغداری در محدوده بستر و حریم رودخانه دره ائورت در محدوده بازه‌های اول، سوم و پنجم (۹۶/۰۲/۲۵)

### ارزیابی سیلاب‌های شبیه‌سازی شده رودخانه دره ائورت

خلاصه سیلاب‌های رخ داده در طی سال‌های اخیر در جدول (۲) ذکر شده است (سالنامه آماری آب کشور، ۸۱ - ۹۳). نتایج این جدول نشان‌دهنده رخداد سیلاب‌های بزرگی در محدوده رودخانه دره ائورت است. محدوده‌های درگیر سیلاب در پهنه‌های شبیه‌سازی شده با مناطق تحت تأثیر مخاطره سیلاب رخ داده هم‌خوانی داشته و بیانگر صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده برای دوره‌های بازگشت مختلف است.

1 Channel Narrowing

2 Channelization



جدول ۲: خلاصه سیلاب‌های رخ داده در محدوده رودخانه دره انورت

تاریخ وقوع سیلاب	توضیحات مربوط به رخداد سیلاب‌های رودخانه دره انورت
۸۱/۳/۸	سیلاب با حداکثر دبی لحظه‌ای ۱۴۴ مترمکعب بر ثانیه باعث تخریب برخی پل‌ها و خسارت به بخش‌هایی از اراضی کشاورزی شده است.
۸۴/۲/۱۶	سیلاب با حداکثر دبی لحظه‌ای ۱۷۴ مترمکعب بر ثانیه خسارات قابل توجهی به زمین‌های کشاورزی وارد کرده است.
۸۵/۲/۱۸	سیلاب با حداکثر دبی لحظه‌ای ۵۹۰ مترمکعب بر ثانیه بخش‌های عظیمی از پهنه دشت سیلابی حاشیه رودخانه را در بر گرفت و بسیاری از اطراف روستاهای بالادست تا روستای بران درخطر مواجه با سیلاب قرارداد.
۸۹/۴/۲	سیلاب عظیم با حداکثر دبی لحظه‌ای ۲۴۰ مترمکعب بر ثانیه سبب خسارات به روستاهای حاشیه رودخانه و اراضی کشاورزی شده است.
۹۰/۳/۹	سیلاب با حداکثر دبی لحظه‌ای ۱۲۲ مترمکعب بر ثانیه باعث تخریب برخی پل‌ها و خسارت به بخش‌هایی از اراضی کشاورزی شده است.
۹۱/۳/۲	این سیلاب با حداکثر دبی لحظه‌ای ۱۱۲ مترمکعب بر ثانیه باعث خسارت به بخش‌هایی از اراضی کشاورزی شده است.
۹۱/۷/۷	سیلاب بزرگ با حداکثر دبی لحظه‌ای ۲۶۴ مترمکعب بر ثانیه سبب خسارات به روستاهای حاشیه رودخانه و اراضی کشاورزی شده است.
۹۲/۳/۱۲	این سیلاب با حداکثر دبی لحظه‌ای ۱۱۰ مترمکعب بر ثانیه باعث خسارت به بخش‌هایی از اراضی کشاورزی شده است.
۹۳/۳/۲۹	سیلاب با حداکثر دبی لحظه‌ای ۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه سبب خسارات به روستاهای حاشیه رودخانه و اراضی کشاورزی شده است.

مطالعه سیلاب در قالب بازه‌های مطالعاتی در طول مجرای رودخانه توسط پژوهشگران زیادی اساس مطالعه قرار گرفته است. در این ارتباط مدل HEC-RAS از جمله نرم‌افزارهای مورد استفاده در امر شبیه‌سازی سیلاب‌های مجرا است. در سال‌های اخیر استفاده از این نرم‌افزار توسط پژوهشگران رشته‌های علوم زمین مورد توجه است. نتایج شبیه‌سازی سیلاب با سیلاب‌های واقعی رخ داده در بخش‌های مختلف کشور بیانگر دقت بالای مدل هیدرولیکی HEC-RAS است (رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۷؛ خیری زاده و همکاران، ۱۳۹۶؛ رحیمی، ۱۳۹۶).

### نتیجه‌گیری

با توجه به فراوانی وقوع مخاطرات سیلابی در کشور و خسارت جانی و مالی هنگفتی که برای مردم و دولت به همراه دارد، لزوم مطالعه هر چه بیشتر این مخاطره طبیعی بیش‌ازپیش در سطح کشور احساس می‌شود. رودخانه دره انورت یکی از رودخانه‌های دائمی استان اردبیل می‌باشد که در طی سال‌های اخیر همواره با رخداد سیلاب‌های بزرگی مواجه بوده است. در این تحقیق سیلاب‌های رودخانه دره انورت با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS در محیط GIS مورد تجربه و تحلیل قرار گرفته و پراکنش فضایی این سیلاب‌ها شبیه‌سازی شده است. با توجه به دخل و تصرف صورت گرفته در محدوده بستر و حریم رودخانه توسط کشاورزان منطقه، لزوم مدیریت دشت سیلابی و آزادسازی اراضی اطراف رودخانه امری بسیار ضروری می‌باشد. در این تحقیق جهت بررسی دقیق‌تر، محدوده مورد مطالعه به ۵ بازه تقسیم شد. طی مطالعات میدانی صورت گرفته، تصرف محدوده بستر و حریم رودخانه دره انورت سبب تنگ‌شدگی مجرای رودخانه گشته و در آینده خطر وقوع سیلاب را افزایش خواهد داد. تحلیل‌های نرم‌افزار HEC-RAS نشان داد که با سیلابی با دوره بازگشت ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله به ترتیب نزدیک ۱۴۹۳، ۱۷۴۳، ۱۹۱۱، ۲۱۰۳ و ۲۲۶۱ هکتار از اراضی حاصل خیز دشت سیلابی با

مخاطره سیلاب روبه‌رو خواهند بود. افزایش مساحت پهنه‌های سیل گیر رودخانه تا دوره بازگشت ۱۰۰ ساله نسبت به دوره‌های بازگشت بالاتر شدیدتر می‌باشد. همچنین خروجی پراکنش فضایی سیلاب‌های شبیه‌سازی شده نشان داد که در صورت رخداد سیلاب‌های با دوره‌های بازگشت ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله حاشیه‌های برخی از روستاهایی چون: شورستان، فرخ‌لو، ولی بی‌گلو، کد خدالو، دلیک یارقان، لکوان، کچی قشلاقی، دوزچه علیا در معرض مخاطره سیلاب قرار خواهند گرفت. همچنین مطالعه سیلاب‌های رودخانه دره ائورت در ۵ بازه مورد بررسی قرار گرفت. از این ۵ بازه سه بازه در منطقه کوهستانی و بخش‌های با شیب زیاد قرار دارد. از بین ۵ بازه بیشترین مخاطره سیلاب مربوط به بازه ۴ است. از نظر ژئومورفولوژی این بخش جزو محدوده دشت‌سر و تلاقی دشت و کوهستان است. بیشترین شبکه آبراهه وارده به رودخانه در سه بازه اول در محدوده کوهستان است و با ورود به دشت به سرعت به حالت واگرا در محدوده دشت پخش می‌شود. مقایسه سیلاب‌های ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری بران با نتایج سیلاب شبیه‌سازی شده در مدل HEC-RAS و پراکنش فضایی آن در محیط GIS نشان‌دهنده همخوانی هرچه بیشتر این دو با یکدیگر بوده و دقت بالای سیلاب‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل HEC-RAS را نشان می‌دهد. در آخر جهت مدیریت بهتر دشت سیلابی رودخانه دره ائورت استفاده از سامانه‌ی WEB GIS جهت تهیه نقشه‌های سیلاب به صورت لحظه‌ای پیشنهاد می‌گردد.

#### منابع

- خیری زاده‌آروق، منصور؛ رضایی مقدم، محمدحسین؛ زجبی، معصومه؛ دانش فراز، رسول. ۱۳۹۶. تحلیل تغییرات جانبی مجرای رودخانه زرینه‌رود با استفاده از روش‌های ژئومورفولوژیکی. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. شماره ۴. صص ۷۶-۱۰۲.
- راهنمای پهنه‌بندی سیل و تعیین حد بستر و حریم رودخانه، ۱۳۸۴، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، نشریه شماره ۳۰۷.
- رحیمی، مسعود. ۱۳۹۶. بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر مورفولوژی مجرای رودخانه قره‌سو از سد سیلان تا تلاقی رودخانه اهر چای. استاد راهنما: محمدحسین رضایی مقدم، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز.
- رضایی مقدم، محمدحسین؛ عاشوری، محمد؛ پیری، زهرا. ۱۳۹۲. بررسی تغییر مورفولوژی بستر رودخانه پس پیشواز از احداث سد با استفاده HEC RAS-GIS (پایین دست سد ستارخان). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. شماره ۱. صص ۸۷-۱۰۰.
- رضایی مقدم، محمدحسین؛ یاسی، مهدی؛ نیک جو، محمدرضا؛ رحیمی، مسعود. ۱۳۹۷. پهنه‌بندی و تحلیل مورفولوژی کی سیلاب‌های رودخانه قره‌سو با استفاده از مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS (از روستای پیرازمیان تا تلاقی رودخانه اهر چای). جغرافیا و مخاطرات محیطی. شماره ۲۵. صص ۱-۱۵.
- سالنامه آماری آب کشور، ۱۳۸۱-۱۳۹۳، معاونت آب و آیفاء، وزارت نیرو، تهران.
- لایقی، صدیقه؛ کرم، امیر. ۱۳۹۳. طبقه‌بندی هیدروژئومورفولوژیکی رودخانه جاجرود با مدل روزگن. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. شماره ۳. صص ۱۳۰-۱۴۳.
- یاسی، مهدی، ۱۳۹۴، جزوه درسی هیدرولیک مجاری روباز، دوره کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه ارومیه.
- یمانی، مجتبی؛ تورانی، مریم؛ چزغه، سمیرا. ۱۳۹۱. تعیین پهنه‌های سیل گیر با استفاده از مدل HEC-RAS (بالادست رودخانه طالقان). جغرافیا و مخاطرات محیطی. شماره ۱. صص ۱-۱۶.
- Bates, P. D. (2004). *Computationally efficient modelling of flood inundation extent. In European Science Foundation Workshop, edited by BIOS, Bologna.*

- Brunner, Gary.W (2010). *Hec-ras River analysis system system hydraulic reference manual, us army corps of engineers, version 4.1.*
- Di Baldassarre, G. (2012). *Floods in a changing climate: Inundation modelling (Vol. 3).* Cambridge University Press.
- Di Baldassarre, G. (2012). *Floods in a changing climate: Inundation modelling (Vol. 3).* Cambridge University Press.
- Hong, H., Panahi, M., Shirzadi, A., Ma, T., Liu, J., Zhu, A. X., & Kazakis, N. (2018). *Flood susceptibility assessment in Hengfeng area coupling adaptive neuro-fuzzy inference system with genetic algorithm and differential evolution. Science of the Total Environment, 621, 1124-1141.*
- Iosub, M. Minea, I. Hapciuc, O. & Romanescu, G. H. (2015). *The use of HEC-RAS modelling in flood risk analysis. Aerul si Apa. Componente ale Mediului, 315.*
- Jha AK, Bloch R, Lamond J (2012) *Cities and flooding: a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century. The World Bank, Washington, DC.*
- Khattak, M. S. Anwar, F. Saeed, T. U. Sharif, M. Sheraz, K. & Ahmed, A. (2016). *Floodplain mapping using HEC-RAS and ArcGIS: a case study of Kabul River. Arabian Journal for Science and Engineering, 41(4), 1375-1390.*
- Marchi, L. Borga, M. Preciso, E. and Gaume, E. (2010) 'Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management', *Journal of Hydrology, Vol. 394, Nos. 1-2, pp.118-133.*
- Martin, O. Rugumayo, A. & Ovcharovichova, J. (2012). *Application of HEC HMS/RAS and GIS tools in flood modeling: A case study for river Sironko-Uganda. Journal of Engineering, Design and Technology, 1(2), 19-31.*
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2015). *Flood susceptibility analysis and its verification using a novel ensemble support vector machine and frequency ratio method. Stochastic environmental research and risk assessment, 29(4), 1149-1165.*
- UNISDR, CRED, 2015. *The Human Cost of Weather Related Disasters, 1995-2015, The United Nations Office for Disaster Risk Reduction, available online at: <https://www.unisdr.org/archive/46793>.*
- Ward, Andy, L. Dabrosio, Meckleburg, Den (2008) *Stream Classification, Agriculture and natural resources, AEX -445-01, pp 1-8.*