پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال دهم، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۰
صص. ۱۱۱-۹۳

تحلیل مکانی مخاطره سیلاب در حوضه آبریز قلعه‌چای عجب‌شیر با استفاده از GIS و مدل HEC-HMS

پریچهر مصری علمداری *- استادیار گروه جغرافیا- آب و هواشناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۱۴ تائید نهایی: ۱۳۹۹/۱۲/۲۱

چکیده

در پژوهش حاضر خطر سیلاب در سطح حوضه آبریز قلعه‌چای به صورت مکانی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. پهنه‌بندی و ارزیابی مکانی خطر سیلاب گامی اساسی در مدیریت ریسک سیلاب به شمار می‌رود. برای پهنه‌بندی خطر سیلاب در سطح حوضه قلعه‌چای تعداد هشت متغیر شامل ارتفاع، شیب، تحدب سطح زمین، عمق دره، تراکم زهکشی، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی و پوشش گیاهی با کاربست منطق فازی در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ترکیب شدند. کاربرد منطق فازی برای پهنه‌بندی سیلاب شامل دو گام اساسی نرمال‌سازی لایه‌های موضوعی با استفاده از توابع مختلف فازی‌ساز و روی‌هم‌گذاری فازی آنها می‌باشد. برای روی‌هم‌گذاری فازی لایه‌های مربوطه از اپراتور گامای فازی بهره گرفته شد. همچنین، به منظور ارزیابی سیل‌خیزی و تولید رواناب در سطح حوضه از شبیه‌سازی بارش- رواناب با مدل HEC-HMS و HEC-GeoHMS استفاده گردید. نتایج مدل مذکور می‌تواند منجر به شناسایی پهنه‌های با تولید رواناب بالاتر شده که گامی اساسی در راستای مهار و کنترل سیلاب در سرچشمه‌ها به‌شمار می‌رود. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که سیلاب را می‌توان یکی از جدی‌ترین مخاطرات محیطی منطقه به‌شمار آورد. بر اساس نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب با کاربست گامای فازی می‌توان بیان داشت که در حدود ۷/۷ درصد از سطح حوضه از خطرپذیری بسیار بالایی نسبت به سیلاب برخوردار است. پهنه‌های مذکور عمدتا منطبق بر دشت‌های سیلابی حاشیه رودخانه قلعه‌چای بوده که بستر سکنی‌گزینی و فعالیت‌های انسانی منطقه می‌باشند. این امر، باعث افزایش مخاطره سیلاب در سطح حوضه مطالعاتی شده و آسیب‌پذیری جوامع ساکن حوضه را به‌شدت افزایش می‌دهد. شبیه‌سازی بارش- رواناب نشان می‌دهد که بارش-های با دوره بازگشت بالاتر (مخصوصا بالاتر از ۲۵ سال) می‌توانند باعث ایجاد دبی‌های سیلابی شوند. زیرحوضه‌های میانی حوضه به دلیل عواملی مانند پوشش گیاهی ضعیف، گستردگی زیاد خاک-های گروه D، شماره منحنی (CN) بالا، فراوانی برونزدهای سنگی، شیب زیاد، کشیدگی اندک، زمان تمرکز و تاخیر پایین از سیل‌خیزی بالایی برخوردار می‌باشند و در واقع می‌توان گفت که سهم قابل-توجهی از سیلاب‌های حوضه از این پهنه‌ها نشات می‌گیرند.

واژگان کلیدی: سیلاب، GIS، منطق فازی، مدل HEC-HMS، حوضه قلعه‌چای.

---

* نویسنده مسئول: E-mail: p_mesry_a@yahoo.com

مقدمه

سیل را می‌توان به عنوان غرقاب شدن موقت اراضی در خارج از محدوده طبیعی آب تعریف کرد. سیلاب‌ها در حوضه‌های رودخانه‌ای کوچک و بزرگ، خورها، سواحل و نیز به صورت محلی اتفاق می‌افتند. در کنار این شرایط عمومی، سیل‌ها را می‌توان با توجه به علت بروز، مانند سیلاب‌های ناشی از باران‌های زمستانی، سیل‌های ناشی از رگبارهای همرفتی تابستانی، سیلاب‌های ناشی از ذوب برف، سیلاب‌های ناشی از امواج خروشان دریا و جزر و مد، سونامی‌ها، سیلاب‌های ناشی از بالاآمدن آب‌های زیرزمینی، سیل‌های ناشی از فاضلاب شهری و سیلاب‌های ناشی از شکست سد یا مخازن کنترلی طبقه‌بندی نمود (شانزه[1] و همکاران، ۲۰۰۴: ۲). سیل فرآیندی دینامیک محسوب می‌شود که دارای مولفه فضایی است؛ بدین معنی که سیلاب در مکان خاصی اتفاق می‌افتد که در آن فاکتورهای دخیل گوناگونی جهت وقوع وجود دارد. به عنوان نمونه، شرایط معمول بروز سیل شامل سطوح با شیب ملایم، بارش سنگین باران و خاک اشباع شده می‌باشد (الکما[2]، ۲۰۰۴). در واقع، سیلاب‌ها در نتیجه‌ی ترکیب دو نوع علل متمایز فیزیکی ایجاد می‌شوند: (۱) علل اولیه: این موارد به دلیل شرایط هواشناسی و اتمسفری مرتبط با ویژگی‌های اقلیمی منطقه است. رخدادهای بارش باران، انواع، شدت‌ها، جهت‌ها، بارندگی بیش از حد و غیره، از جمله متغیرهای ضروری این دلایل به شمار می‌روند. (۲) علل ثانویه: این موارد به ویژگی‌های سطح حوضه زهکشی از نظر ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و غیره مربوط می‌شوند. عناصر ضروری شامل مساحت حوضه آبریز، شیب، تراکم زهکشی، طول کانال اصلی، زمان تمرکز و غیره می‌باشند (شن، ۲۰۱۸: ۱۷).

سیل از جمله بلایای طبیعی به‌شمار می‌رود که گاهاً موجب خسارات مالی و جانی می‌شود و پیامدهای مالی، زیست محیطی و اجتماعی زیادی در پی دارد (شن[3]، ۲۰۱۸: ۱۷). درواقع، رخداد سیلاب متداول‌ترین نوع مخاطره طبیعی در سراسر جهان است؛ به‌گونه‌ای که این مخاطره درحدود ۴۰ درصد بلایای طبیعی را به خود اختصاص داده است (وارنر[4]، ۲۰۱۱: ۱). فراوانی و پیامدهای حوادث حدی سیلاب در دهه‌های اخیر در سراسر جهان به سرعت افزایش یافته است و تغییرات اقلیمی احتمالاً این روند را در آینده نزدیک تشدید می‌کند. عوامل اصلی در این افزایش ریسک عبارتند از: تغییرپذیری اقلیمی و رخدادهای حدی؛ رشد جمعیت جهانی و افزایش فعالیت‌های اقتصادی – اقتصادی در مناطق مستعد سیل؛ همراه با وابستگی متقابل و روزافزون آنها به زیرساخت‌ها و سازه‌های حفاظت از سیل و زهکشی که بخش قابل توجهی از آنها از وضعیت ناشناخته یا وخیمی برخوردار هستند (وان هرک[5]، ۲۰۱۴: ۲). در واقع، بسیاری از جوامع به دلیل دارا بودن خاک حاصلخیز و قابلیت حمل و نقل و ترابری آسان در دشت‌های سیلابی سکنی گزیده‌اند. نرخ بالای رشد جمعیت و سکونتگاه‌های انسانی (و سرمایه‌گذاری‌ها) در مناطق مستعد سیل منجر به افزایش خطر سیلاب شده است، که می‌تواند به عنوان ترکیبی از خطر سیل و یک عامل در معرض آسیب دیده شود (استین و استین[6]، ۲۰۱۴). علاوه بر این، پیش‌بینی‌ها از رشد آتی جمعیت و تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد که این روند آهنگ پرشتابی خواهد گرفت (وینسمیوس[7] و همکاران، ۲۰۱۵). از این‌رو، حمایت از استراتژی‌های کاهش ریسک سیل از طریق ارتقای شناخت از توزیع فضایی خطر سیلاب از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است (ماکانگو مالکولو، ۲۰۱۶: ۲). در این زمینه، تهیه نقشه‌های خطر سیل ابزاری موثر به منظور ارزیابی و مدیریت ریسک سیل به شمار می‌رود. مهم‌ترین اهداف تهیه نقشه خطر سیل را می‌توان بدین شرح بیان داشت: (۱) پشتیبانی از برنامه‌های

1. Schanze
2. Alkema
3. Şen
4. Warner
5. Van Herk
6. Stein and Stein
7. Winsemius

مدیریت سیل، (۲) کاربری اراضی و فعالیت‌های برنامه‌ریزی مکانی، (۳) برنامه‌های اضطراری و تخلیه و (۴) افزایش آگاهی‌های عمومی از ریسک‌های سیل (الکانتارا- ایالا و گودی[۱]، ۲۰۱۰: ۱۱۶).

مدیریت ریسک سیل با طیف گسترده‌ای از موضوعات و اقدامات- از پیش‌بینی خطرات سیل و پیامدهای اجتماعی آنها تا اقدامات و ابزارهای کاهش ریسک- سروکار دارد. با توجه به این جنبه های گوناگون، مدیریت ریسک سیل مستلزم رویکردی سیستماتیک و یکپارچه است (شانزه و همکاران، ۲۰۰۴: ۱). امروزه تخمین پهنه‌های در معرض سیلاب با استفاده از تکنیک سنجش از دور (RS) همراه با داده‌های موجود در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام می‌شود. این امر تهیه نقشه خطر سیل و نقشه اولویت‌بندی توسعه اراضی را امکان‌پذیر می‌سازد. رویکرد مذکور به طراحی زیرساخت‌های کنترل سیل و ارائه عملیات امداد و نجات برای نواحی پر خطر در طی سیل‌های آینده کمک خواهد کرد. بدین ترتیب GIS نقش عمده‌ای در تکنیک‌های کنترل سیل دارد و ادغام این داده‌ها در یک پایگاه داده فضایی بسیار مهم است (گوش[۲]، ۲۰۱۴: ۳۶۴). در پژوهش حاضر ارزیابی مکانی مخاطره سیل حوضه آبریز قلعه‌چای در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) دارای دو بعد سیل‌گیری (خطر پخش سیلاب) و سیل‌خیزی (تولید رواناب) می‌باشد. پهنه‌بندی خطر سیلاب (پخش سیلاب- سیل‌گیری) مشتمل بر ترکیب و روی‌هم‌گذاری متغیرهای مختلف است. در پژوهش حاضر برای ترکیب متغیرهای موثر بر خطر سیلاب از منطق فازی در بستر GIS استفاده شد. منطق فازی به دلیل توانایی در ترکیب انعطاف‌پذیر لایه‌های موضوعی و همچنین کاهش عدم قطعیت‌های مرتبط با فرایند طبقه‌بندی و تصمیم‌گیری مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در این زمینه می‌توان به پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از رویکرد فازی توسط قنواتی (۱۳۹۲) برای شهر کرج، قنواتی و همکاران (۱۳۹۴) برای حوضه خیاوچای، موسوی و همکاران (۱۳۹۵) برای حوضه شهر باغملک، لائی[۳] و همکاران برای حوضه رودخانه دونگ‌ژیانگ، (۲۰۱۵) وانگ[۴] و همکاران (۲۰۱۹) برای چند حوضه کوچک در چین، سونمز و بیزیمانا[۵] (۲۰۲۰) برای واورلی سیتی آیووا اشاره نمود. برای ارزیابی سیل‌خیزی یا تولید رواناب در سطح حوضه آبریز قلعه‌چای از شبیه‌سازی بارش- رواناب استفاده به عمل آمد. مدل بارش - رواناب رابطه بین بارش و رواناب در سطح یک حوضه آبریز را توصیف می‌کند. این مدل، رواناب سطحی در کانال یا سیستم رودخانه را به عنوان پاسخی به داده‌های ورودی بارش برای حوضه آبخیز هدف تخمین می‌زند. تعداد زیادی برنامه نرم‌افزاری مدل بارش - رواناب موجود است و هرکدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. یکی از برنامه‌های نرم‌افزاری بارش- رواناب که به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد، سیستم مدل‌سازی هیدرولوژیک[۶] HEC (HEC-HMS) است. مدل ریاضیاتی HEC-HMS برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های دندریتیک طراحی شده است (فلدمن[۷]، ۲۰۰۰؛ شارفنبرگ[۸]، ۲۰۱۳). این مدل فرایندهای بارش- رواناب و روندیابی در حوضه‌های آبریز طبیعی یا کنترل‌شده را شبیه‌سازی می‌کند. کاربست HEC-HMS در مدل‌سازی بارش- رواناب در زمینه‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته شده است. یکی از اهداف مهم مطالعاتی HEC-HMS پیش‌بینی سیل است. نبل[۹] و همکاران (۲۰۰۵) پژوهش را در زمینه مدل‌سازی سیل در مقیاس منطقه‌ای با استفاده از رادار، GIS و HEC-HMS / HRAS برای حوضه رودخانه سن‌آنتونیو[۱۰]، ایالات متحده انجام دادند. این تحقیق نشان داد که مدل مزبور توانایی انجام مطالعات هیدرولوژیکی در مقیاس منطقه‌ای برای یک حوضه

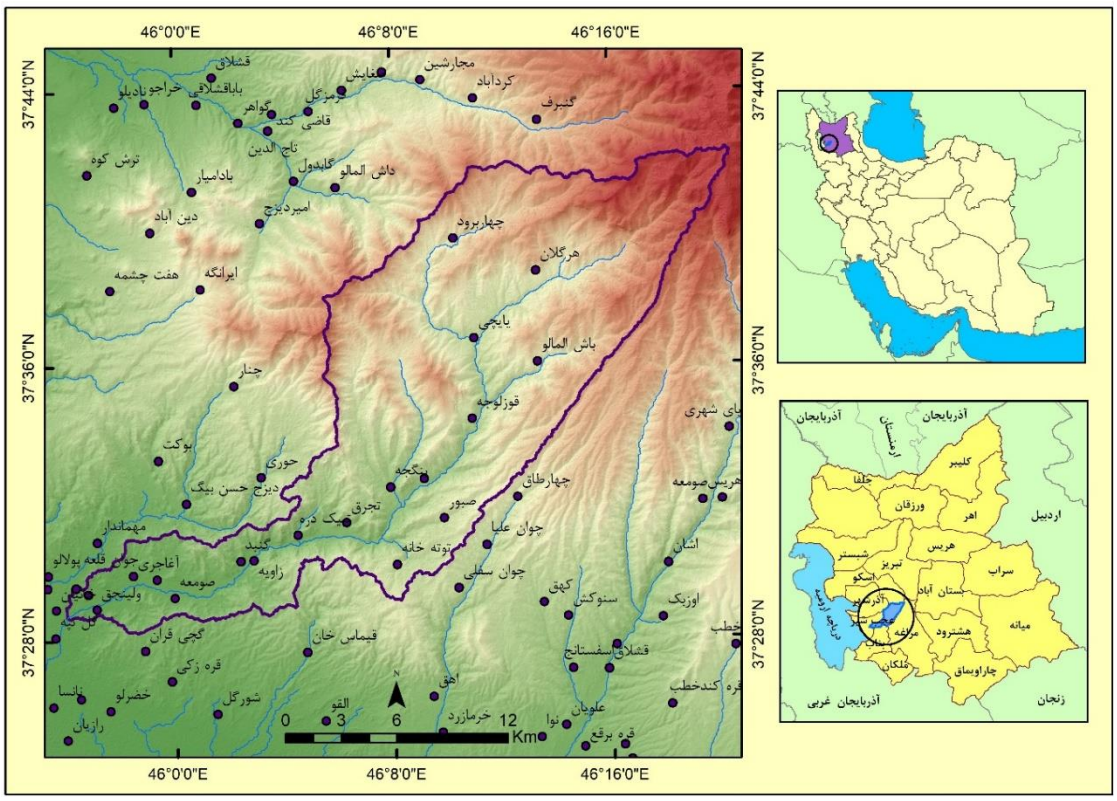
1. Alcántara-Ayala and Goudie
2. Ghosh
3. Lai
4. Wang
5. Sönmez and Bizimana
6. HEC Hydrologic Modelling System (HEC-HMS)
7. Feldman
8. Scharffenberg
9. Knebl
10. San Antonio

بزرگ را دارد. مطالعه دیگری توسط اولییبلو[1] در مورد پیش‌بینی سیل با استفاده از HEC-HMS در حوضه‌های آبریز میسائی و وانان[2] چین انجام پذیرفت. مدل HEC-HMS دبی اوج قابل انتظار را با دقت بالایی پیش‌بینی کرد و نویسنده نتیجه گرفت که HEC-HMS برای پیش‌بینی سیل در حوضه‌های آبریز مورد مطالعه مناسب است. در برخی موارد نیز روش‌شناسی مورد استفاده در پژوهش حاضر به صورت ترکیبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این زمینه می‌توان به بررسی علل وقوع سیلاب و مخاطرات آن در حوضه آبریز زنوزچای با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و منطق فازی توسط فتحعلی‌زاده و همکاران (۱۳۹۹) و تحلیل ریسک سیلاب با استفاده از مدل‌های فازی و HEC-HMS در حوضه رودخانه کالو- گنگا واقع در سریلانکا توسط ناندالال و راتنایاک[3] (۲۰۱۱) اشاره کرد.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر حوضه آبریز قلعه‌چای است. حوضه مطالعاتی با مختصات جغرافیایی ۴۵ درجه و ۵۵ دقیقه و ۵۰ ثانیه تا ۴۶ درجه و ۲۰ دقیقه و ۳۰ ثانیه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۲۸ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه و ۴۰ ثانیه عرض شمالی در محدوده شهرستان عجب‌شیر استان آذربایجان شرقی واقع شده است (شکل ۱). این حوضه با مساحتی بالغ بر ۳۴۲ کیلومتر مربع بخش‌هایی از دامنه‌های غربی توده آتشفشانی سهند را زهکشی می‌کند. شرایط ژئومورفولوژیکی و اقلیم‌شناسی حاکم بر منطقه باعث شده است که رفتار هیدرولوژیکی حوضه آبریز قلعه‌چای از تغییرپذیری مکانی و زمانی بسیار زیادی برخوردار باشد. در این رابطه، رخداد سیلاب در منطقه مطالعاتی از پتانسیل بالایی برخوردار است. مشاهده حداکثر بارش ۲۴ ساعته ۵۰ میلی‌متر و دبی‌های پیک بیش از ۱۲۰ مترمکعب در ثانیه نمونه‌ای از پتانسیل بالای سیل‌خیزی حوضه آبریز قلعه‌چای می‌باشد. تقریبا تمامی سکونتگاه‌های موجود در منطقه مطالعاتی در مجاورت آبراهه‌های اصلی حوضه- مخصوصا رودخانه قلعه‌چای- استقرار یافته‌اند. این امر آسیب‌پذیری جوامع انسانی ساکن در محدوده حوضه مطالعاتی را به‌جد افزایش می‌دهد. در این زمینه می‌توان به خسارات و تلفات جانی و مالی سیلاب فروردین ماه سال ۱۳۹۶ اشاره نمود.

1. Oleyiblo
2. Misai an Wan'an
3. Nandalal and Ratnayake



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز قلعه‌چای در استان آذربایجان شرقی

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر به پهنه‌بندی و ارزیابی مکانی سیل‌گیری و سیل‌خیزی حوضه آبریز قلعه‌چای پرداخته می‌شود. در ادامه داده‌ها و روش‌های مورد استفاده به صورت اجمالی معرفی می‌گردند.

برای ارزیابی مکانی و یا پهنه‌بندی خطر سیلاب در سطح حوضه آبریز قلعه‌چای از هشت متغیر مهم شامل ارتفاع، شیب، عمق دره، تراکم زهکشی، تحدب سطح زمین، فاصله از رودخانه، پوشش گیاهی و کاربری اراضی بهره گرفته شد. متغیرهای مذکور به صورت لایه‌های موضوعی در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) تهیه شده و وارد ژئودیتابیس گردیدند. بخش عمده‌ای از داده‌های مورد نیاز برای پهنه‌بندی خطر سیلاب در منطقه مطالعاتی متکی بر تصاویر مدل رقومی ارتفاع (DEM) می‌باشد که بدین منظور تصاویر ماهواره ALOS-PALSAR مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب از روی تصاویر DEM منطقه لایه‌های ارتفاع، شیب، عمق دره، تحدب سطح زمین، تراکم زهکشی و فاصله از رودخانه حاصل گردیدند. برای تهیه لایه‌های پوشش گیاهی و کاربری اراضی نیز از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel و Google Earth استفاده به عمل آمد. در چارچوب تهیه نقشه خطر سیلاب تمامی متغیرهای مذکور می‌بایست ترکیب شوند. در پژوهش حاضر برای ترکیب و روی‌هم‌گذاری متغیرهای مذکور از منطق فازی بهره گرفته شد. روی‌هم‌گذاری فازی در بستر GIS شامل دو گام اساسی می‌باشد. در گام نخست می‌بایست با استفاده از توابع مختلف فازی نسبت به بی‌بعدسازی لایه‌های موضوعی اقدام شود. بدین ترتیب تمامی لایه‌های موضوعی در دامنه بین ۰ و ۱ قرار می‌گیرند. در گام دوم با استفاده از

اپراتورهای مختلف فازی نسبت به روی‌هم‌گذاری لایه‌ها اقدام گردید. در این رابطه، پنج اپراتور فازی به شرح زیر وجود دارد (لی[1]، ۲۰۰۷؛ ازری[2]، ۲۰۱۹؛ فتحعلی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۹):

رابطه (۱)– «و» فازی $\mu_{combination} = MIN(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \ldots)$

رابطه (۲)– «یا» فازی $\mu_{combination} = MAX(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \ldots)$

رابطه (۳)– ضرب فازی $\mu_{combination} = \prod_{i=1}^{n} \mu_i$

رابطه (۴)– جمع فازی $\mu_{combination} = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - \mu_i)$

رابطه (۵)– گامای فازی $_{combination} = (\text{Fuzzy algebraic sum})^{\lambda} * (\text{Fuzzy } \mu \text{ algebraic product})^{1-\lambda}$

در روابط مذکور، μi تابع عضویت فازی برای لایه موضوعی i ام و λ یک پارامتر انتخابی در دامنه (۱و۰) است. در پژوهش حاضر گامای فازی از بهترین عملکرد برخوردار بوده و درنتیجه ترکیب صورت گرفته با این تابع به عنوان نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر سیلاب انتخاب گردید.

پس از پهنه‌بندی خطر سیلاب و شناسایی پهنه‌های سیل‌گیر به منظور مهار و مدیریت خطر سیلاب شناسایی پهنه‌های سیل‌خیز یا پهنه‌های با بیشترین تولید رواناب ضرورت پیدا می‌کند. در پژوهش حاضر برای ارزیابی تولید رواناب در پهنه‌های مختلف حوضه آبریز قلعه‌چای از شبیه‌سازی بارش– رواناب در بستر نرم‌افزار HEC-HMS و اکستنشن HEC-GeoHMS در محیط نرم‌افزار ArcGIS استفاده به عمل آمد. داده‌های مربوطه برای اجرای این مدل علاوه بر داده‌های فوق‌الذکر شامل داده‌های هیدروگراف، هایتوگراف و گروه‌های هیدرولوژیک خاک می‌باشد که از طریق سازمان آب منطقه‌ی استان آذربایجان شرقی تهیه گردید. این مدل ریاضیاتی فرآیندهای بارش– رواناب و روندیابی را در حوضه‌های آبریز طبیعی یا کنترل‌شده شبیه‌سازی می‌کند. داده‌های مکانی می‌تواند از HEC-GeoHMS به HEC-HMS وارد شود و مدل می‌بایست جریان، تراز و زمان‌بندی برای حوضه را بر اساس مجموعه داده های مشخص هواشناسی و اطلاعات کاربری اراضی پیش‌بینی کند. HEC-HMS از روش‌های مختلفی برای تجزیه و تحلیل هیدرولوژیکی پیوسته یا مبتنی بر رویداد استفاده می‌کند. با توجه به حجم زیاد مطالب مرتبط با مدل HEC-HMS و از طرف دیگر، وجود منابع متعدد در این خصوص از توضیحات بیشتر اجتناب می‌شود و تنها به بیان روش‌های مورد استفاده در این پژوهش اکتفا می‌گردد. در کل، سه مولفه اصلی در مدل HEC-HMS وجود دارد: مدل حوضه، مدل هواشناسی و مشخصات کنترل[3]. مدل حوضه از عناصر حوضه و زیر حوضه، ارتباطات و پارامتر رواناب تشکیل شده است. مدل هواشناسی شامل داده‌های بارندگی و تبخیر است؛ در حالی که مشخصات کنترل شامل زمان‌بندی شروع / توقف (خاتمه) و فواصل محاسبه برای اجرا است. مجموعه‌ای از روش‌های مختلف برای شبیه‌سازی تلفات نفوذ در دسترس است. در پژوهش حاضر از روش شماره منحنی SCS بهره

---

1. Lee
2. Esri
3. control specification

گرفته شد. هفت روش برای تبدیل بارش مازاد به رواناب سطحی (هیدروگراف واحد کلارک، موج سینماتیک، مادکلارک، هیدروگراف واحد SCS، هیدروگراف واحد اسنایدر، نمودار مشخص شده توسط کاربر و هیدروگراف واحد مشخص شده توسط کاربر) گنجانده شده است. در این پژوهش از روش هیدروگراف واحد SCS استفاده گردید. برای مدل روندیابی نیز روش ماسکینگام به کار بسته شد. در نهایت، در راستای مدل هواشناسی از هایتوگراف استفاده به عمل آمد. در پژوهش حاضر داده‌های مکانی مورد نیاز مدل از طریق اکستنشن HEC-GeoHMS تهیه گردیدند. HEC-GeoHMS یک اکستنشن برای ArcGIS (ESRI) است که توسط سپاه مهندسان ارتش ایالات متحده، مرکز مهندسی هیدرولوژیک (HEC)، منتشر شده و یک جعبه ابزار هیدرولوژی جغرافیایی[1] است که به کاربر اجازه می‌دهد تا پارامترهای حوضه را بر اساس داده‌های توپوگرافی برای استفاده مدل هیدرولوژیک ایجاد کند (سپاه مهندسان ارتش ایالات متحده آمریکا[2]، ۲۰۱۰). HEC-GeoHMS برای تولید پارامترهای هیدرولوژیک، مجموعه داده را از پیش پردازش عوارض زمین محاسبه می کند. بخش قابل توجهی از این داده‌ها با بهره‌گیری از مدل DEM منطقه قابل حصول است. مدل رقومی (DEM) یک مدل رقومی با نمای سه بعدی است که عوارض سطح زمین حوضه آبریز یا منطقه را نشان می‌دهد. از این DEM می توان برای تعیین خصوصیات حوضه آبریز مانند خطوط آبراهه و شبکه زهکشی و تعیین حدود حوضه و زیر حوضه استفاده کرد (جوکیچ[3]، ۲۰۰۸؛ لی[4]، ۲۰۱۴؛ کبیری[5]، ۲۰۱۴).

یافته‌ها

در پژوهش حاضر ارزیابی مکانی مخاطره سیلاب در سطح حوضه آبریز قلعه‌چای به دو موضوع سیل‌گیری و سیل‌خیزی قابل تفکیک است. مفهوم سیل‌گیری اشاره به پهنه‌های در معرض پخش و گسترش سیلاب‌ها اشاره دارد و مفهوم سیل-خیزی در رابطه با تولید رواناب‌های ناشی از بارش می‌باشد و درواقع سیلاب‌ها از این پهنه‌ها نشات می‌گیرند.

پهنه‌بندی سیلاب با استفاده از روی‌هم‌گذاری فازی لایه‌های موضوعی

وقوع سیلاب از ماهیتی مکانی- فضایی برخوردار بوده و حاصل دخالت همزمان متغیرهای مختلفی به شمار می‌رود. بدین ترتیب پهنه‌بندی خطر سیلاب مستلزم تحلیل ترکیبی و یکپارچه متغیرهای تاثیرگذار بر وقوع آن است. در این رابطه، در پژوهش حاضر برای تهیه نقشه خطر سیلاب حوضه آبریز قلعه‌چای از چندین متغیر مهم و اساسی کنترل‌کننده سیلاب استفاده شده و در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) با کاربست منطق فازی ترکیب شدند. خاطر نشان می‌شود که برای تهیه نقشه خطر سیلاب فرض بر این شد که هرچند منشا اصلی سیلاب‌های منطقه مطالعاتی در ارتباط با بارش‌های طولانی‌مدت و مداوم و یا شدید و رگباری می‌باشد اما نحوه تولید و هدایت رواناب‌های تولید شده عمدتا در کنترل متغیرهای ژئومورفولوژیکی و پوشش زمین می‌باشد. توزیع فضایی متغیرهای موثر بر رخداد سیلاب حوضه آبریز قلعه‌چای در شکل (۲) ارائه شده است. در ادامه این متغیرها و کارکردهای آنها بر خطر سیلاب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

متغیر ارتفاع: توزیع فضایی ارتفاع در سطح حوضه آبریز مطالعاتی علاوه بر تاثیر قابل‌توجه بر رفتار هیدرولوژیکی حوضه، مکان‌گزینی سکونتگاه‌ها در سطح منطقه را نیز به‌شدت تحت تاثیر قرار داده است. متوسط ارتفاع حوضه آبریز قلعه‌چای ۲۱۴۴ متر و دامنه تغییرات آن ۲۰۸۵ متر می‌باشد. این کمیت‌ها نشان از مرتفع بودن و تغییرات شدید ارتفاع در سطح منطقه مطالعاتی می‌باشد. به‌واقع، حوضه آبریز قلعه‌چای با زهکشی بخش‌هایی از دامنه غربی توده آتشفشانی سهند از اطراف قله

---

1. geospatial
2. U. S. Army Corps of Engineers
3. Djokic
4. Li
5. Kabiri

تا دشت‌های هموار کرانه‌های شرقی دریاچه ارومیه امتداد یافته است. این اختلاف ارتفاع به‌خودی خود پتانسیل سیل‌خیزی و مخاطرات مرتبط با این فرایند را نشان می‌دهد. به دلیل درجه ناهمواری بالا، اکثریت قریب به اتفاق سکونتگاه‌های منطقه در داخل دره‌ها یا بر روی مخروط‌افکنه عجب‌شیر استقرار یافته‌اند. مخروط‌افکنه عجب‌شیر درنتیجه‌ی رسوب‌گذاری رودخانه قلعه‌چای در محل خروج از کوهستان سهند تشکیل شده و بستر مناسبی را برای فعالیت‌های کشاورزی و سکونت انسان مهیا نموده است. با عطف به توپوگرافی و توزیع ارتفاعات می‌توان بیان داشت که در حالت تطبیقی سطوح کم‌ارتفاع حوضه به دلیل واقع شدن در محل هدایت رواناب‌ها و استقرار سکونتگاه‌ها از خطرپذیری بالاتری نسبت به سیلاب برخوردارند. بدین ترتیب تابع خطی کاهشی فازی می‌تواند برای فازی‌سازی متغیر ارتفاع مورد استفاده قرار گیرد. بدین مفهوم که با افزایش کمیت ارتفاع از درجه عضویت کاسته شده و با کاهش آن بر میزان درجه عضویت افزوده می‌شود.

شیب: عملکرد متغیر شیب مشابه متغیر ارتفاع می‌باشد. میانگین شیب حوضه آبریز قلعه‌چای ۳۲ درصد با انحراف معیار ۲۰ درصد می‌باشد. قلعه‌چای حوضه‌ای پرشیب به شمار می‌رود؛ به گونه‌ای که تنها درحدود ۲/۶ درصد حوضه در طبقه شیب ۰ تا ۵ درصد و ۶/۶ درصد در طبقه شیب ۵ تا ۱۰ درصد واقع شده است. غلبه شیب‌های تند و پرتگاهی بر متغیرهای هیدرولوژیکی و خطر سیلاب در سطح حوضه مطالعاتی اثرات قابل‌توجهی می‌گذارد. در این رابطه، می‌توان به کاهش نفوذپذیری و افزایش آب‌دوی، کاهش زمان تمرکز و کاهش زمان تاخیر زیرحوضه‌ها اشاره نمود. افزون بر این، توپوگرافی خشن و پرشیب باعث استقرار سکونتگاه‌ها انسانی و فعالیت‌های انسانی مربوطه در بستر دره‌های منطقه شده است. این دره‌ها شامل دشت‌های سیلابی حاشیه مجرای رودخانه‌ها می‌باشند و بدین ترتیب همیشه در معرض سیلاب‌های رودخانه‌ای قرار دارند. پهنه‌های منطبق بر راس مخروط‌افکنه عجب‌شیر نیز به دلیل موقعیت قرارگیری در معرض پخش و گسترش سیلاب‌های رودخانه‌ای می‌باشند. همانند متغیر ارتفاع، تابع خطی کاهشی فازی می‌تواند برای فازی‌سازی لایه موضوعی شیب به‌کار گرفته شود. بدین ترتیب، اراضی با شیب کمتر از ۵ درصد به عنوان نقاط ایده‌آل مجموعه فازی محسوب شده و با افزایش شیب از میزان درجه عضویت کاسته می‌شود و می‌توان گفت در شیب‌های بیش از ۳۰ درصد عضویت فازی به مقدار صفر سوق پیدا می‌کند.

تحدب سطح زمین: شاخص تحدب (ایواهاشی و پیکه[1]، ۲۰۰۷) می‌تواند وضعیت مورفولوژیکی سطح زمین را مشخص نماید. مقادیر بالاتر این شاخص نشان‌دهنده سطوح محدب بوده که از احتمال وقوع سیلاب پایینی برخوردار می‌باشند. در واقع، امکان تجمع و انباشت آب در این پهنه‌ها وجود ندارد. این سطوح عمدتا شامل ستیغ‌ها و خط‌الراس‌های حوضه می‌باشند. در حالی که مقادیر پایین‌تر این شاخص نشان دهنده سطوح مقعر هستند. این سطوح مقصد هدایت و انباشت رواناب‌ها می‌باشند و ازاین‌رو درمعرض سیلاب واقع می‌شوند. دررابطه با فازی‌سازی لایه موضوعی تحدب سطح زمین استفاده از تابع کاهشی فازی می‌تواند به نتایج مطلوب منجر شود. مقادیر شاخص تحدب در سطح حوضه آبریز قلعه‌چای از حداقل ۱۹/۱ تا حداکثر ۷۶/۳ متغیر است. بدین ترتیب مقادیر نزدیک به ۱۹/۱ به عنوان نقاط ایده‌آل مجموعه تعریف شده و با کسب درجه عضویت نزدیک به ۱ از خطرپذیرترین پهنه‌ها به‌شمار می‌روند. مقادیر نزدیک به ۷۶/۳ با کسب ارزش صفر به عنوان کم‌خطرترین پهنه‌های از نظر وقوع سیلاب محسوب می‌شوند. مقادیر عضویت فازی سایر پیکسل‌ها در بین این دو ارزش توزیع می‌شوند.

عمق دره: عمق دره یکی دیگر از شاخص‌های مورفولوژیکی می‌باشد که می‌تواند معرفی برای نحوه حرکت و جهت انتقال رواناب‌های تولید شده محسوب گردد. مقادیر بالاتر این شاخص دلالت بر عمق زیاد دره می‌باشد. بدین ترتیب پهنه‌هایی از حوضه آبریز مطالعاتی که دارای مقادیر بالاتر این کمیت می‌باشند از خطرپذیری بالاتری برخوردارند. مقادیر این متغیر در حوضه آبریز قلعه‌چای از حداقل ۰ تا حداکثر ۳۵۳ متر متغیر است. مقادیر پایین این شاخص منطبق بر میاناب‌ها و ستیغ‌های

[1]. Iwahashi & Pike

حوضه و مقادیر بالا منطبق بر دره اصلی حوضه می‌باشند. در فازی‌سازی این متغیر هم تابع خطی افزایشی فازی و هم بزرگ فازی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در پژوهش حاضر به دلیل اهمیت فوق‌العاده مقادیر بالاتر عمق دره در خطرپذیری نسبت به سیلاب از تابع بزرگ فازی استفاده به عمل آمد. با اعمال تابع فازی مذکور، تمامی بستر آبراهه اصلی (رودخانه قلعه‌چای) و دشت‌های سیلابی کم‌عرض حاشیه آن جزو نقاط ایده‌آل مجموعه فازی محسوب شده و درنتیجه از خطرپذیری بالاتری برخوردار می‌شوند.

تراکم زهکشی: یکی دیگر از متغیرهای موثر در وقوع سیلاب، تراکم زهکشی می‌باشد که نسبت طول آبراهه به مساحت زهکشی می‌باشد و برحسب کیلومتر در کیلومترمربع محاسبه می‌شود. در پژوهش حاضر لایه تراکم زهکشی با استفاده از ابزار تراکم[1] نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. مقادیر این کمیت برای حوضه آبریز قلعه‌چای در دامنه ۰/۱۷ تا ۴/۷۷ قرار دارد. سطوح با تراکم بالای زهکشی در محل پیوندگاه‌ها و تلاقی‌های انشعابات متعدد به آبراهه‌های اصلی در قسمت‌های مرکزی حوضه می‌باشد. بدین ترتیب، با افزایش تعداد انشعابات وارد شده به آبراهه‌های اصلی حوضه مطالعاتی بر احتمال وقوع سیلاب افزوده می‌شود چرا که به هنگام رگبارها و بارندگی‌های شدید این آبراهه‌ها مسئول هدایت رواناب‌ها به آبراهه‌های اصلی حوضه می‌باشند و با توجه به تراکم بالای زهکشی در مجاورت آبراهه‌های اصلی به صورت ناگهانی دبی رودخانه افزایش می‌یابد و این احتمال وجود دارد که مجرای اصلی رودخانه ظرفیت لازم برای هدایت این مقدار دبی را نداشته و درنتیجه اراضی اطراف در معرض سیلاب قرار گیرند. در خصوص فازی‌سازی لایه موضوعی تراکم زهکشی می‌توان بیان داشت که رابطه‌ای مستقیم بین تراکم زهکشی و خطر سیلاب برقرار است؛ بدین ترتیب تابع خطی افزایشی فازی می‌تواند برای فازی نمودن لایه موضوعی مذکور مورد استفاده قرار گیرد. بر این اساس، مقادیر نزدیک به ۴/۷۷ به عنوان نقاط ایده‌آل مجموعه تعریف شدند و با فاصله از این نقطه از مقدار عضویت پیکسل‌ها نیزکاسته شده و با نزدیک شدن به مقدار ۰/۱۷ به صفر میل پیدا می‌کند.

فاصله از رودخانه: بدیهی است که در رابطه با سیلاب‌های رودخانه‌ای، پهنه‌ها و مناطق حاشیه رودخانه‌ها از خطرپذیری بالایی برخوردار می‌باشند. در حوضه آبریز قلعه‌چای بالغ بر ۳۱ درصد نقاط مسکونی در فاصله ۰ تا ۲۰۰ متری و ۳۱ درصد نیز در فاصله ۲۰۰ تا ۴۰۰ متری از آبراهه‌های اصلی (مخصوصا رودخانه قلعه‌چای) استقرار یافته‌اند. در سال‌های اخیر توسعه سکونتگاه‌های منطقه در نزدیکی آبراهه‌های اصلی حوضه شرایط پرمخاطره‌ای را از نظر خطر وقوع سیلاب رقم زده است. در واقع، استقرار انسان در پهنه‌های سیل‌گیر باعث تبدیل فرایند طبیعی سیلاب به مخاطره جدی طبیعی شده است. بدین ترتیب تهیه لایه فاصله از آبراهه‌های اصلی و دخالت آن در روی‌هم‌گذاری و تهیه نقشه خطر سیلاب حوضه حائز اهمیت بالایی می‌باشد. در رابطه با فازی‌سازی لایه فاصله از رودخانه از تابع نزدیک فازی استفاده به عمل آمد. کاربست تابع مذکور به دلیل خطرپذیری بسیار بالاتر پهنه‌های نزدیک رودخانه نسبت به سیلاب می‌باشد.

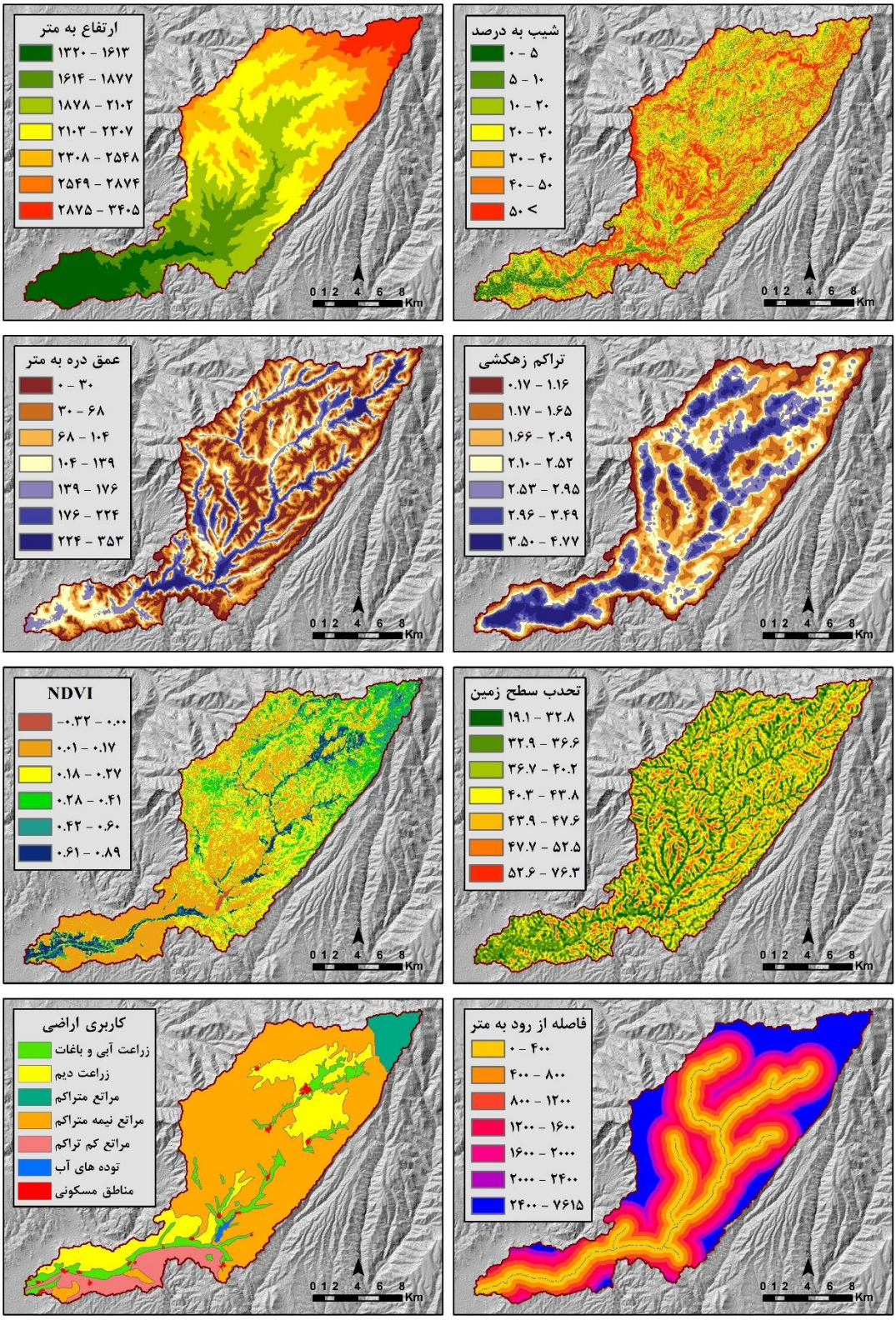
کاربری اراضی: در پژوهش حاضر دو متغیر پوشش زمین (کاربری اراضی و پوشش گیاهی) به عنوان متغیرهای تعدیل-کننده خطرپذیری سیلاب در فرایند روی‌هم‌گذاری و تهیه نقشه خطر سیلاب مورد استفاده قرار گرفتند. حوضه آبریز قلعه‌چای بخش‌هایی از دامنه غربی توده آتشفشانی سهند را زهکشی می‌کند. بدین ترتیب کاربری اراضی حوضه مطالعاتی تحت تاثیر فرماسیون مرتعی این کوهستان می‌باشد. در این رابطه بالغ بر ۷۱ درصد حوضه آبریز قلعه‌چای شامل پوشش مرتعی است که در این میان سهم مراتع متراکم، نیمه متراکم و کم‌تراکم به ترتیب در حدود ۴/۴، ۵۸/۵ و ۷/۹ درصد می‌باشد (شکل ۲). درواقع، به دلیل حاکمیت شرایط اقلیمی نیمه‌خشک بخش اعظم حوضه مطالعاتی (مخصوصا قسمت‌های میانی) شامل مراتع با پوشش گیاهی متوسط می‌باشد. به دلیل خشونت توپوگرافی، کشاورزی آبی به بستر دره‌ها و دشت‌های سیلابی کم‌عرض حوضه محدود شده است. حدود ۹/۲ درصد حوضه آبریز قلعه‌چای با مساحتی بالغ بر ۳۱/۴ کیلومترمربع

[1]. Density

به این نوع کاربری اختصاص یافته است. مساحت اراضی کشاورزی دیم بیشتر بوده و درحدود ۱۹ درصد حوضه شامل این نوع کاربری می‌باشد. در نهایت، کابری مسکونی و ساخته شده درحدود ۰/۶۲ درصد (۲/۱ کیلومترمربع) از سطح حوضه آبریز قلعه‌چای را شامل می‌شود. متغیر کاربری اراضی از نوع کیفی می‌باشد و درنتیجه در مرحله نخست می‌بایست نسبت به کمّی‌سازی آن اقدام شود. برای کمّی‌سازی این لایه کد ۱ برای کلاس کاربری پوشش مراتع متراکم و کد ۷ برای کلاس مناطق مسکونی اختصاص یافت. برای سایر کلاس‌ها هم متناسب با میزان اهمیت در رابطه با خطر وقوع سیلاب کدهایی بین دو کد مذکور اختصاص یافت. در نهایت با استفاده از تابع بزرگ فازی نسبت به فازی‌سازی این لایه اقدام گردید.

پوشش گیاهی: در پژوهش حاضر از شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده[1] (NDVI) به عنوان معرف تراکم فضایی پوشش گیاهی استفاده شد. شاخص مذکور از طریق رابطه NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red) محاسبه می‌شود. در این رابطه NIR و Red به ترتیب بازتاب‌ها در باند مادون قرمز نزدیک (به عوان مثال؛ باند ۸ در ماهواره Sentinel) و باند قرمز (به عنوان مثال؛ باند ۴ در ماهواره Sentinel) هستند. مقادیر این شاخص در محدوده ۱- و ۱+ می‌باشد. مقادیر بالاتر دلالت بر پوشش گیاهی متراکم است. ابر، آب و برف نیز دارای مقادیر منفی هستند. بستر دره‌های اصلی حوضه مطالعاتی با مقادیر NDVI بالاتر از ۰/۶ مشخص می‌شوند. مقادیر بالاتر این شاخص در دره‌های مذکور ناشی از تمرکز فعالیت‌های کشاورزی (مخصوصا به صورت باغات مثمر) در این سطوح می‌باشد. همچنین شاخص NDVI در بالادست حوضه مطالعاتی که مشتمل بر مراتع با پوشش گیاهی خوب است از مقادیر بالایی برخوردار می‌باشد. در سایر قسمت‌های حوضه مطالعاتی این شاخص از تغییرپذیری فضایی بالایی برخوردار است؛ با این حال بخش‌هایی زیادی از حوضه مطالعاتی در قسمت‌های میانی و پایین‌دست از NDVI کمتر از ۰/۲ برخوردارند که نشان از ضعیف بودن پوشش گیاهی است. پوشش گیاهی متراکم به دلیل افزایش نفوذپذیری خاک و درنتیجه افزایش زمان تمرکز و زمان تاخیر نقش قابل‌توجهی در تعدیل مخاطرات سیلاب برعهده دارد. درنتیجه، رابطه‌ای معکوس بین پوشش گیاهی و خطر سیلاب وجود دارد. بر این اساس، به منظور فازی‌سازی لایه موضوعی NDVI از یک تابع خطی کاهشی فازی استفاده به عمل آمد.

[1]. Normalized Difference Vegetation index

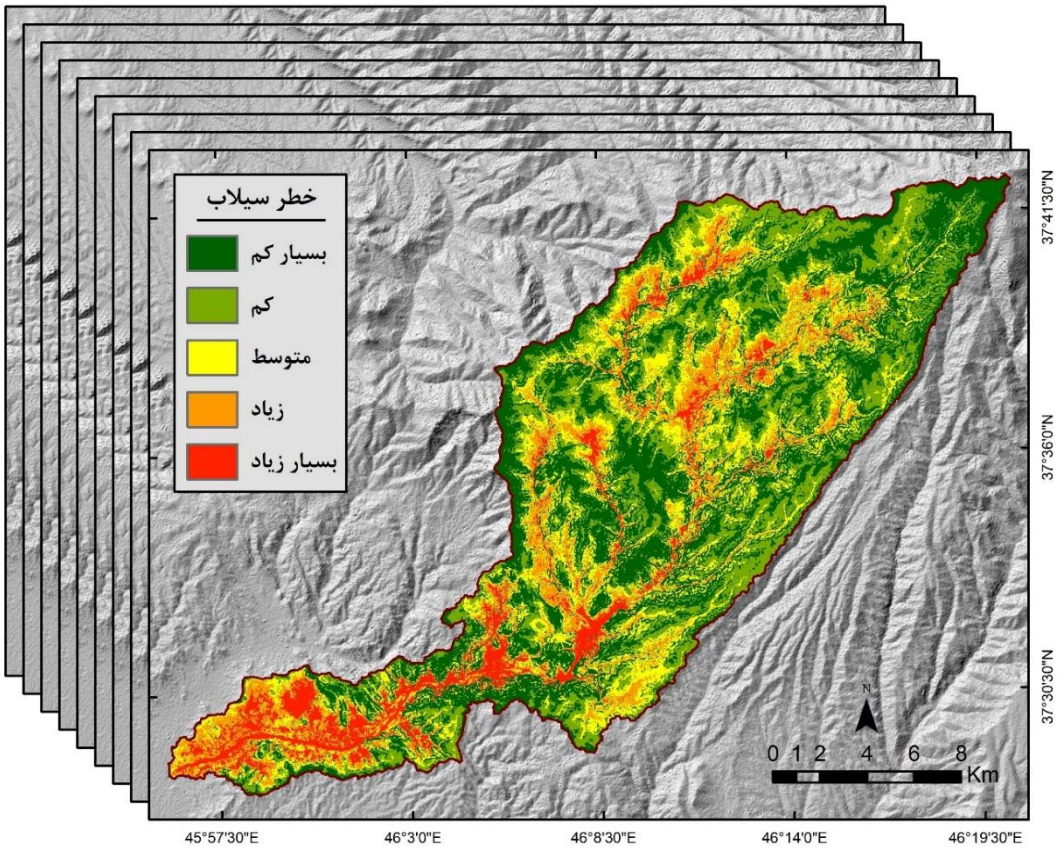


شکل ۲: توزیع فضایی متغیرهای موثر بر خطر سیلاب در سطح حوضه آبریز قلعه‌چای

با اعمال توابع فازی مختلف بر لایه‌های رستری موثر بر خطر سیلاب، لایه‌های موضوعی بی‌بُعدی در مقیاس ۰ تا ۱ حاصل شد. در ادامه، لایه‌های موضوعی فازی (در مقیاس صفر تا یک) با استفاده از پنج اپراتور «و» فازی، «یا» فازی، جمع جبری

فازی، ضرب جبری فازی و فازی گاما ترکیب گردیدند. اپراتور «و» فازی مقدار کمّینه‌ی درجه عضویت را استخراج می‌کند. از این‌رو، در بین تمامی لایه‌های موضوعی، کمترین ارزش هر پیکسل استخراج شده و در لایه نهایی اعمال می‌گردد. برای حوضه آبریز قلعه‌چای همپوشانی لایه‌های موضوعی با استفاده از عملگر «و» فازی نشان داد که در حدود ۹۶ درصد از کل منطقه مطالعاتی مقادیر نزدیک به صفر را کسب نمودند و بدین ترتیب تقریبا کل منطقه در کلاس با خطرپذیری بسیار پایین واقع گردید. در ضرب فازی نیز لایه‌های موضوعی در هم ضرب می‌گردند. از این‌رو، این اپراتور باعث می‌شود که ارزش‌ها در لایه خروجی به سمت صفر تمایل پیدا کنند. بدین ترتیب، تعداد پیکسل‌های بسیار کمتری در کلاس با خطرپذیری بالا واقع می‌شود. به همین دلیل، نتایج پهنه‌بندی خطر سیلاب حوضه آبریز قلعه‌چای با استفاده از ضرب فازی با اندکی تفاوت مشابه «و» فازی می‌باشد و تقریبا تمامی منطقه (حتی پهنه‌های بلافصل رودخانه‌ها) در کلاس با خطرپذیری بسیار کم قرار گرفت. برعکس دو عملگر مذکور، با اعمال دو اپراتور «یا» فازی و جمع جبری فازی، تقریبا کل حوضه آبریز قلعه‌چای در کلاس با خطرپذیری بسیار بالا تشخیص داده شد. در «یا» فازی مقادیر عضویت خروجی بوسیله مقادیر ماکزیمم هر لایه ورودی تعیین می‌گردد. برای منطقه مورد مطالعه همپوشانی با استفاده از اپراتور «یا» فازی نتایج عکس همپوشانی «و» فازی را نشان داد و تقریبا در حدود ۹۷ درصد از کل حوضه آبریز قلعه‌چای با داشتن مقادیر بین ۰/۹۵ تا ۱ در طبقه بسیار خطرپذیر قرار گرفتند. جمع جبری فازی، متمم ضرب جبری فازی محسوب می‌گردد. درنتیجه، در لایه نهایی برخلاف اپراتور ضرب جبری فازی، ارزش پیکسل‌ها به سمت یک تمایل پیدا خواهد کرد. بنابراین، تعداد پیکسل‌های بسیار بیشتری در کلاس با خطرپذیری بسیار زیاد قرار می‌گیرند. به واقع، کل حوضه آبریز قلعه‌چای با استفاده از اپراتور جمع فازی دارای مقادیر بین ۰/۹۳ تا ۱ شد و درنتیجه، تمامی منطقه در کلاس بسیار خطرپذیر قرار گرفت. درنتیجه، پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده چهار اپراتور فوق‌الذکر به طور کلی رد شد و به منظور جلوگیری از اطاله کلام از آوردن نقشه‌های مربوط به این اپراتورها اجتناب گردید. برعکسِ این اپراتورها، اپراتور گامای فازی جهت همپوشانی لایه‌های رستری موضوعی و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب به نتایج مناسب و مقبولی منجر گردید. این اپراتور در واقع ترکیبی از اپراتورهای جمع جبری فازی و ضرب فازی به حساب می‌آید.

براساس نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از گامای فازی (شکل ۳) می‌توان بیان داشت که درصد مساحت کلاس‌های با خطرپذیری متوسط، کم و بسیار کم در سطح حوضه آبریز قلعه‌چای به ترتیب در حدود ۱۸/۱، ۲۷/۷ و ۳۳/۵ درصد می‌باشد. بدین ترتیب، در نگاه نخست چنین می‌نماید که خطر وقوع سیلاب در سطح حوضه آبریز قلعه‌چای نسبتا پایین است؛ اما ذکر این نکته مهم است که مخاطرات طبیعی در رابطه با اثر آن بر انسان و فعالیت‌های آن معنا و مفهوم پیدا می‌کند. به بیان ساده، سیلاب‌ها- صرف‌نظر از نقش انسان در بروز یا تشدید آن- به عنوان یک فرایند طبیعی محسوب گردیده و جزو دینامیک رودخانه‌ها به‌شمار می‌روند؛ با این حال، انسان با استقرار در پهنه‌های تحت تاثیر این فرایندها خود را در معرض تهدید قرار می‌دهند و درواقع، فرایند طبیعی تبدیل به مخاطره طبیعی می‌گردد. در مورد حوضه آبریز قلعه‌چای نیز این امر صادق است. درواقع، در حدود ۷/۷ درصد از محدوده حوضه آبریز قلعه‌چای در کلاس خطر بسیار زیاد و ۱۳ درصد آن در کلاس خطر زیاد قرار گرفته است. پهنه‌های با خطرپذیری بسیار زیاد عمدتا منطبق بر دشت‌های سیلابی داخل دره‌های اصلی منطقه می‌باشند. این دشت‌های سیلابی به دلیل عمیق و کم‌عرض بودن دره‌های منطقه از توسعه چندانی برخوردار نیستند؛ با این حال بستر مکان‌گزینی سکونتگاه‌های انسانی و فعالیت‌های کشاورزی به‌شمار می‌روند. درحدود ۶۰ درصد از مساحت نقاط مسکونی منطقه در این پهنه‌های بسیار خطرپذیر استقرار یافته‌اند. همچنین بالغ بر ۲۴ درصد اراضی کشاورزی زراعی و باغات منطقه منطبق بر این پهنه‌ها می‌باشند. علاوه بر این، بالغ بر ۲۶ درصد مساحت کاربری مسکونی منطقه و ۲۹ درصد اراضی کشاورزی آبی و باغات منطقه در کلاس با خطرپذیری بالا واقع شده‌اند. موارد مذکور خطرپذیری بالای حوضه آبریز قلعه‌چای را نشان می‌دهند.



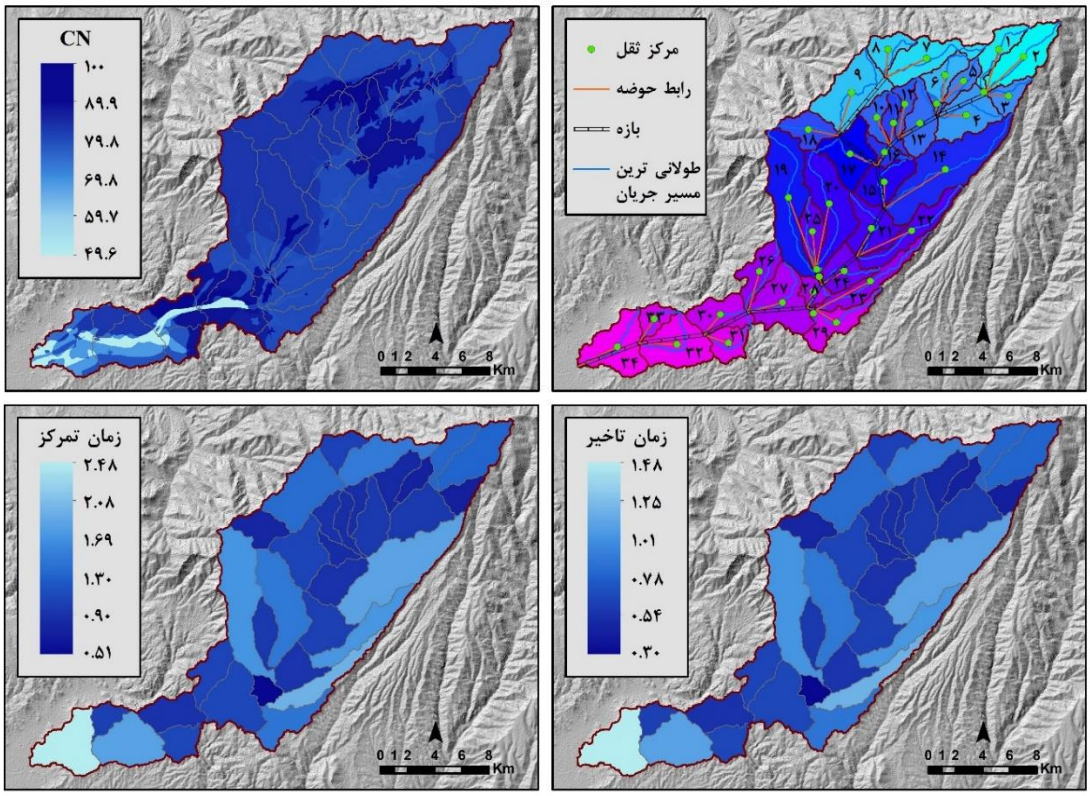
شکل ۳: نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب در سطح حوضه آبریز قلعه‌چای با کاربست منطق فازی

ارزیابی پهنه‌های سیل‌خیز با استفاده از مدل HEC-HMS و HEC-GeoHMS

ارزیابی خطر سیلاب در سطح حوضه آبریز قلعه‌چای نشان داد که سیلاب‌ها می‌توانند جزو مهم‌ترین مخاطرات محیطی منطقه مورد مطالعه به‌شمار آیند. راهکاری اساسی و بنیادین برای مدیریت و کاهش اثرات این مخاطره می‌تواند مهار سیلاب در سرچشمه‌ها باشد. به بیان دیگر، پهنه‌هایی از حوضه که از پتانسیل تولید رواناب و دبی‌های اوج بالاتری برخوردارند شناسایی شده و با مجموعه‌ای از اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای- ازقبیل اقدامات بیولوژیکی و احداث بندهای کوچک- نسبت به کنترل سیلاب‌ها اقدام نمود. در این رابطه، شناسایی پهنه‌های سیل‌خیز از اهمیت زیادی برخوردار است. این امر باعث تمرکز فعالیت‌های کنترلی در نقاط خاصی از حوضه می‌گردد. بدین منظور در پژوهش حاصل برای شناسایی پهنه‌های سیل‌خیز از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و اکستنشن آن در بستر نرم‌افزار ArcGIS یعنی HEC-GeoHMS بهره گرفته شد و به شبیه‌سازی بارش- رواناب در سطح حوضه اقدام گردید. شبیه‌سازی بارش- رواناب در این مدل بر اساس سه مولفه اصلی مدل حوضه، مدل هواشناسی و مشخصه‌های کنترل صورت می‌گیرد.

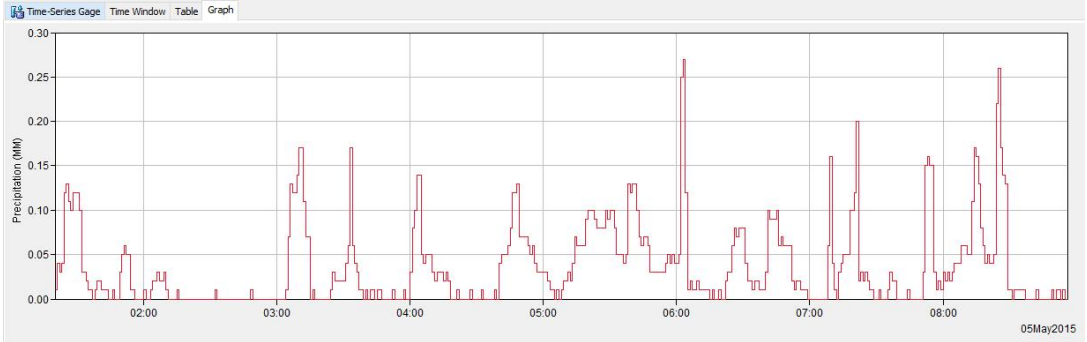
- مولفه‌های مدل حوضه: در این رابطه تعداد زیادی از متغیرها وجود دارند که برای شبیه‌سازی بارش- رواناب در مدل HEC-HMS ضروری می‌باشند. طبیعتا با توجه به حجم زیاد داده‌ها و متغیرها، امکان معرفی و ارائه آنها در این مبحث نمی‌گنجد. بخش عمده‌ای از مولفه‌های حوضه‌ای مورد نیاز مدل HEC-HMS از طریق اکستنشن HEC-GeoHMS در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه گردید. در این رابطه، متغیرهای ارتفاع، شیب و کاربری اراضی در مبحث خطر سیلاب به صورت خلاصه معرفی شدند. مبنای بسیاری از محاسبات براساس روش SCS (سازمان حفاظت خاک آمریکا) می‌باشد. در این رابطه توزیع شماره منحنی (CN) در سطح حوضه حائز اهمیت زیادی است. در اکستنشن HEC-GeoHMS تهیه این لایه موضوعی نیازمند سه لایه کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیک خاک و DEM

هیدرولوژیکی حوضه می‌باشد. لایه گروه‌های هیدرولوژیک خاک حوضه مطالعاتی از طریق سازمان آب منطقه‌ای تهیه گردید. در شکل (۴) توزیع فضایی شماره منحنی (CN) حوضه ارائه شده است. بر این اساس، مقادیر CN در حوضه آبریز قلعه‌چای از حدود ۵۰ تا ۱۰۰ متغیر است. پایین‌ترین مقدار CN در نزدیکی خروجی حوضه (راس مخروط‌افکنه عجب‌شیر) دیده می‌شود که منطبق بر خاک‌های عمیق تکامل‌یافته و پوشش گیاهی مطلوب (عمدتا باغات) است. مقادیر بالاتر این متغیر نیز منطبق بر خاک‌های گروه هیدرولوژیکی D با کاربری مراتع ضعیف می‌باشد. توزیع متغیرهای زمان تمرکز و زمان تاخیر زیرحوضه‌ها نیز با توجه به اهمیت زیاد این متغیرها در شبیه‌سازی بارش- رواناب حوضه در شکل (۴) ارائه شده است.

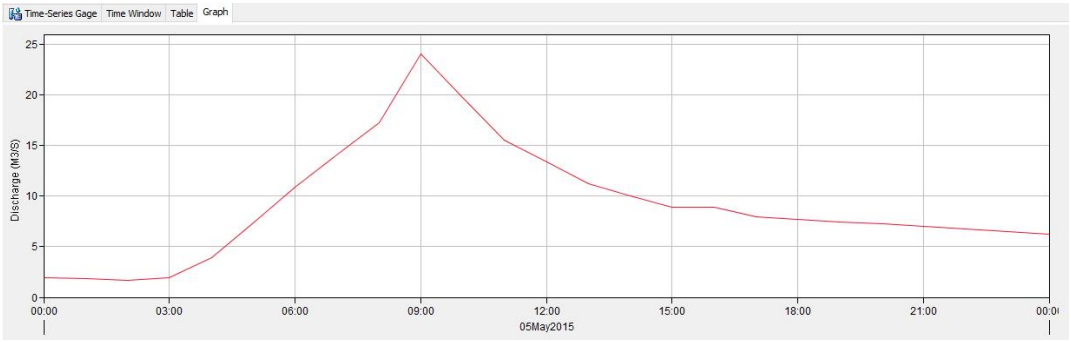


شکل ۴: توزیع فضایی زیرحوضه‌ها، شماره منحنی (CN)، زمان تمرکز و زمان تاخیر در سطح حوضه آبریز قلعه‌چای

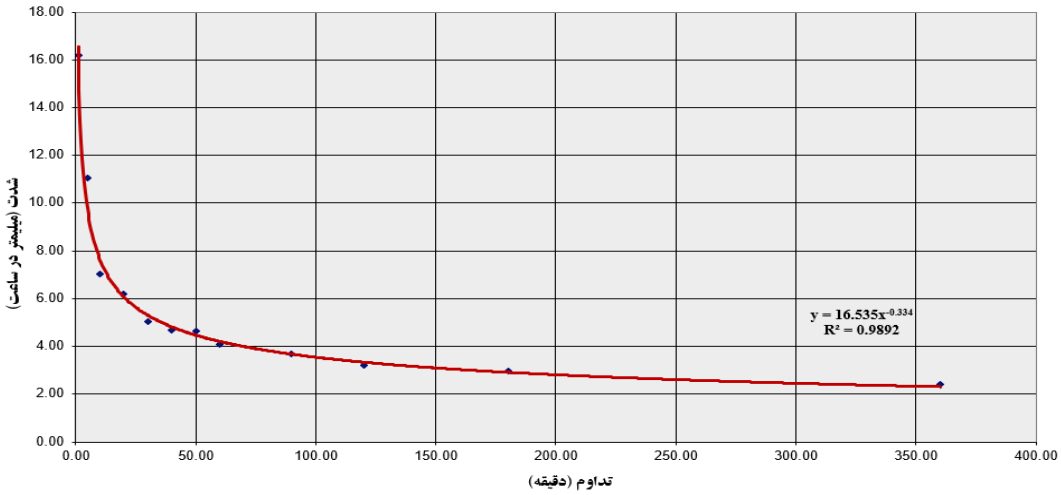
- مولفه‌های مدل هواشناسی: در ادامه، داده‌های هواشناسی به عنوان مهم‌ترین داده‌های مورد استفاده در این مولفه وارد مدل شدند. داده‌های هایتوگراف، هیدروگراف و مدت- شدت برای این مولفه بسیار مهم و اساسی می‌باشند. در این رابطه داده‌های همزمان هایتوگراف و هیدروگراف از اهمیت بسیاری زیادی برخوردار می‌باشند. خوشبختانه برای حوضه آبریز قلعه‌چای از این داده‌ها موجود می‌باشد (به عنوان مثال، شکل‌های ۵، ۶ و ۷).



شکل ۵: نمونه‌ای از هایتوگراف برای یک بارش در مورخه ۱۳۹۴/۲/۱۵



شکل ۶: نمونه‌ای از هیدروگراف برای یک سیلاب در مورخه ۱۳۹۴/۲/۱۵



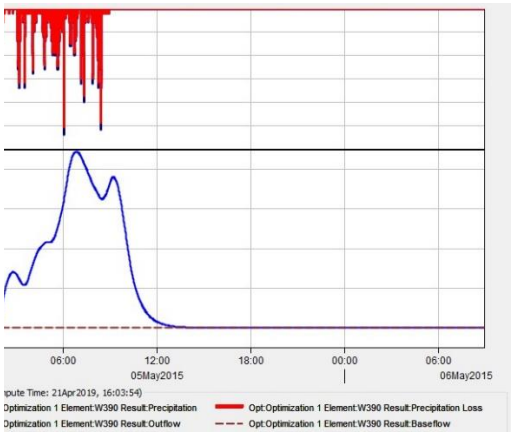
شکل ۷: نمونه‌ای از منحنی شدت- مدت برای بارش مورخه ۱۳۹۴/۲/۱۵

– مشخصه‌های کنترل: از این طریق تاریخ و زمان شروع و خاتمه پروژه و همچنین گام زمانی[1] برای شبیه‌سازی به مدل معرفی گردید.

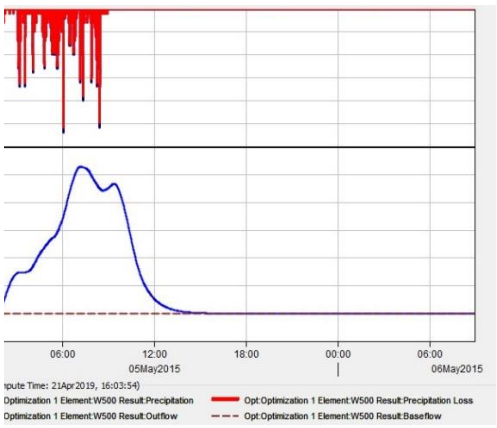
پس از اجرای مدل نسبت به کالیبره کردن و بهینه‌سازی نتایج مدل اقدام گردید. برای تخمین پارامترها در نرم‌افزار HEC-HMS از فرایند بهینه‌سازی[2] که فرایندی تکرار شونده است، استفاده می‌شود. در این فرایند برای کمینه کردن میزان اختلاف هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی، یک تابع هدف در عنصری که در آن هیدروگراف مشاهداتی وجود دارد، بکار می‌رود و این تابع به گونه‌ای تعریف می‌شود که اگر مقدار هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی در عنصر مورد نظر کاملا برابر شوند، مقدار آن برابر صفر شود. همچنین، برای این تابع هدف، قیود به گونه‌ای تعریف می‌شوند که مقادیر پارامترهای تخمین زده شده در محدوده مجاز باشند. در این فرایند بهینه‌سازی از دو روش بهینه‌سازی یک و چندمتغیره با شروع از مقداری مشخص و تعیین شده توسط کاربر استفاده می‌شود و مبنای توقف آن، رسیدن مقدار تابع هدف به حد مشخص و یا انجام شدن تعداد تکرارهای مشخص است (مدرسی و عراقی‌نژاد، ۱۳۹۶: ۱۹۷ به نقل از فتحعلی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۹). دقت شبیه‌سازی‌ها در حدود ۸۹ درصد می‌باشد که رقمی قابل قبول به شمار می‌رود. در شکل‌های (۸ و ۹) نمونه‌ای از هیدروگراف محاسباتی بعد از فرایند بهینه‌سازی ارائه شده است.

---

1. Time Interval
2. Optimization



شکل ۸: هیدروگراف محاسباتی زیرحوضه ۷ بعد از بهینه-سازی



شکل ۹: هیدروگراف محاسباتی زیرحوضه ۳۰ بعد از بهینه-سازی

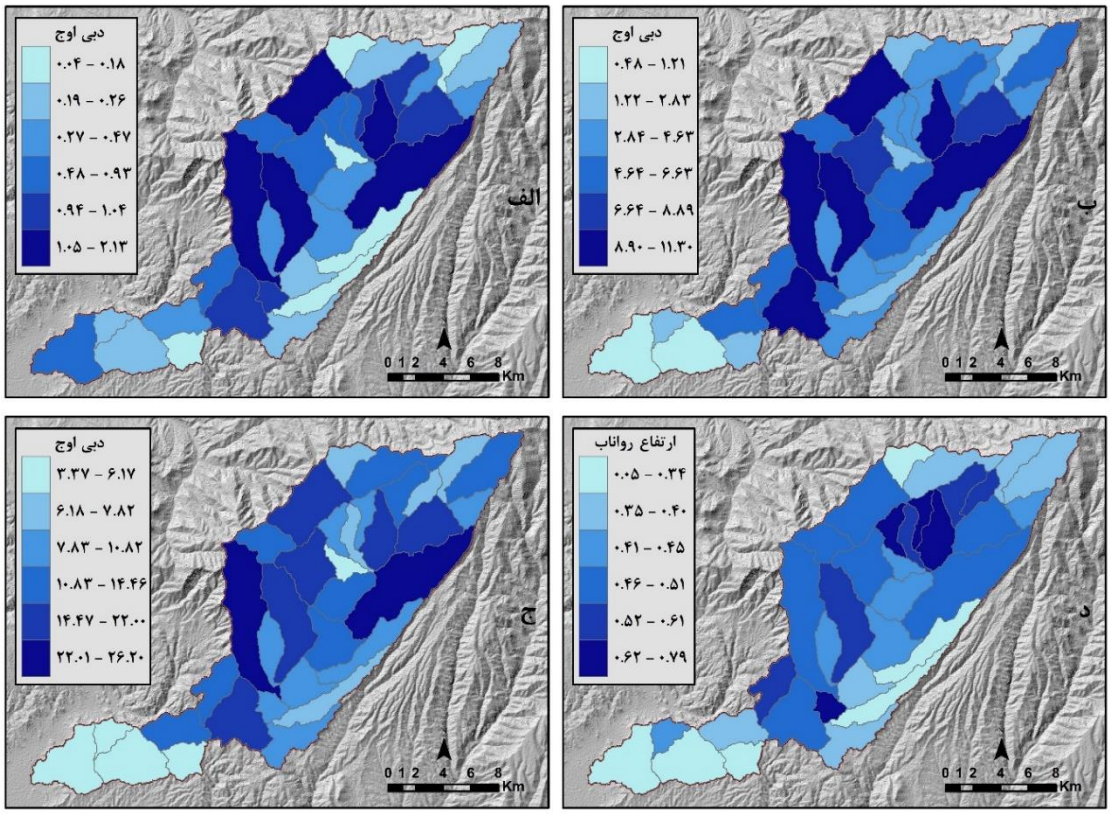
در پژوهش حاضر دبی‌های پیک حوضه و زیرحوضه‌ها برای بارش‌های ۱۶/۲۲، ۳۲ و ۵۰ میلی‌متری شبیه‌سازی شد (شکل ۱۰). در سطح حوضه آبریز قلعه‌چای بارش‌های حدود ۱۶ میلی‌متری تقریبا منطبق بر بارش با دوره بازگشت ۵ ساله، بارش‌های ۳۲ میلی‌متری منطبق بر بارش‌های با دوره بازگشت ۲۵ ساله و در نهایت بارش‌های ۵۰ میلی‌متری تقریبا منطبق بر بارش با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله می‌باشد. بدیهی است که بارش‌های با دوره بازگشت بالاتر می‌توانند مخاطرات جدی محیطی مخصوصا سیلاب را در پی داشته باشند. نتایج حاصله می‌تواند برای شناسایی نقاط سیل‌خیز حوضه و تمرکز اقدامات آبخیزداری مورد استفاده قرار گیرد. این نتایج را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

– حداکثر بارش‌های ۲۴ ساعته با دوره بازگشت کمتر از ۱۰ سال مخاطره چندانی را در سطح حوضه آبریز قلعه‌چای ایجاد نمی‌کنند. دبی اوج حوضه مطالعاتی برای بارش حدود ۱۶ میلی‌متر مطابق شبیه‌سازی بارش– رواناب بالغ بر ۱۴/۲ مترمکعب در ثانیه بوده و آبراهه‌های منطقه به راحتی ظرفیت عبور این حجم از دبی را دارند. دبی پیک اکثر زیرحوضه‌ها برای این مقدار بارش کمتر از ۱ مترمکعب در ثانیه می‌باشد که رقم قابل‌توجهی به شمار نمی‌رود (شکل ۱۰، الف). تنها در زیرحوضه-های ۱۳، ۲۰، ۱۹، ۹، ۱۴، ۲۷، ۴ و ۶ دبی پیک از ۱ مترمکعب در ثانیه فراتر می‌رود. با افزایش بارش‌ها، رفتار هیدرولوژیکی حوضه آبریز مطالعاتی شکل مخاطره‌آمیزتری به خود می‌گیرد؛ به گونه‌ای که برای بارش ۳۲ میلی‌متری، دبی اوج حوضه به حدود ۱۲۸ مترمکعب در ثانیه بالغ می‌شود. این حجم سیلاب می‌تواند به صورت محلی مخاطراتی را متوجه سکونتگاه‌ها و اراضی کشاورزی حاشیه رودخانه‌ها نماید. دبی اوج زیرحوضه‌ها برای این حجم بارش نیز افزایش قابل‌توجهی پیدا می‌کند (شکل ۱۰، ب). این امر در رابطه با زیرحوضه‌های فوق‌الذکر از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. زیرحوضه‌های مذکور در قسمت‌های میانی و بالادست حوضه آبریز مطالعاتی واقع شده‌اند و با اینکه در اکثر موارد خطر مستقیمی برای سکونتگاه‌ها ایجاد نمی‌کنند اما به عنوان زیرحوضه‌های با بیشترین میزان دبی نقش قابل‌توجهی در تولید رواناب و سیل‌خیزی حوضه برعهده دارند. بدیهی است که با افزایش دوره‌های بازگشت حداکثر بارش‌های ۲۴ ساعته بر میزان مخاطرات سیلاب در سطح منطقه افزوده می‌شود. در این رابطه، دبی پیک حوضه برای یک بارش حدود ۵۰ میلی‌متری افزون بر ۳۳۴ مترمکعب در ثانیه می‌باشد. این مقدار دبی برای حوضه نسبتا کوچک قلعه‌چای رقم قابل‌توجهی بوده و بی‌تردید مخاطراتی جدی را برای سکونتگاه‌ها و تاسیسات مجاور رودخانه ایجاد خواهد نمود. دبی پیک زیرحوضه‌های مذکور نیز روند صعودی پرشتابی به خود گرفته و از ۱۹ مترمکعب در ثانیه فراتر می‌رود (شکل ۱۰، ج).

– اگر متغیر مساحت نیز در اولویت‌بندی سیل‌خیزی (تولید رواناب) زیرحوضه‌ها لحاظ شود می‌توان گفت که زیرحوضه‌های ۲۸، ۱۲، ۱۳، ۶، ۱۰، ۵، ۱۱ و ۱۸ از سیل‌خیزی بالاتری برخوردار هستند. این زیرحوضه‌ها در قسمت‌های بالادست حوضه

آبریز مطالعاتی و اکثرا در مجاور هم قرار گرفته‌اند. عوامل متعددی باعث سیل‌خیزی این زیرحوضه‌ها شده‌اند که می‌توان به شیب زیاد، پوشش گیاهی ضعیف، شماره CN بالا، زمان تمرکز و تاخیر پایین، کشیدگی کمتر و غیره اشاره نمود.

– هر چند بارش در حوضه آبریز مطالعاتی مسئول اصلی تولید رواناب‌های سطحی می‌باشد اما نتایج شبیه‌سازی بارش–رواناب حوضه نشان می‌دهد که متغیرها و پارامترهای متعدد دیگری مسئول نحوه تبدیل بارش به رواناب و هدایت آنها می‌باشند. در این رابطه، متغیرهای ژئومورفولوژیکی و پوشش زمین و خاک از اهمیت بیشتری برخوردارند. در خصوص این متغیرها در سطح حوضه آبریز مطالعاتی می‌توان به شیب زیاد حوضه، پوشش گیاهی نسبتا ضعیف (مخصوصا در قسمت‌های میانی و پایین‌دست)، فراوانی برونزدهای سنگی و خاک‌های با نفوذپذیری اندک (خاک‌های گروه D) اشاره کرد. در این رابطه، ارتفاع رواناب تولید شده از بارش‌های با مقدار ۳۲ میلی‌متر (شکل ۱۰، د) می‌تواند به عنوان راهنما مورد استفاده قرار گیرد. ارتفاع رواناب (برای بارش ۳۲ میلی‌متری) برای زیرحوضه‌های قلعه‌چای از حداقل ۰/۵۰ تا حداکثر ۰/۷۹ سانتی‌متر متغیر است. ارتفاع رواناب بالاتر در ارتباط با حاکمیت سطوح غیرقابل نفوذ یا با نفوذپذیری اندک و کاربری‌های با پوشش گیاهی اندک یا مسکونی می‌باشد. زیرحوضه‌های با ارتفاع رواناب زیاد در قسمت‌هایی از میانه و بالادست حوضه تمرکز یافته‌اند که منشا سیلاب‌های حوضه نیز محسوب می‌شوند. تمرکز فعالیت‌های آبخیزداری در زیرحوضه‌های با تولید رواناب بیشتر می‌تواند کمک شایانی در کاهش خطر سیلاب در سطح حوضه داشته باشد. بدیهی است که اقدامات آبخیزداری با افزایش زمان تمرکز و زمان تاخیر یا افزایش نفوذ آب در خاک می‌تواند به کاهش مخاطره سیلاب در قسمت‌های پایین‌دست منجر شود.



شکل ۱۰. دبی‌های پیک (به مترمکعب در ثانیه) برای بارش‌های ۱۶ میلی‌متری (شکل الف)، ۳۲ میلی‌متری (شکل ب)، ۵۰ میلی‌متری (شکل ج) و ارتفاع رواناب (به سانتی‌متر) برای بارش ۳۲ میلی‌متری

نتیجه‌گیری

ارزیابی خطر سیلاب در سطح حوضه آبریز قلعه‌چای مهم‌ترین هدف پژوهش حاضر بود. بدین منظور از منطق فازی و مدل HEC-HMS در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده به عمل آمد. در این چارچوب منطق فازی برای بی‌بعدسازی و روی‌هم‌گذاری فازی لایه‌های موضوعی موثر بر رخداد سیلاب و مدل HEC-HMS به منظور شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب در سطح حوضه مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای سیل‌گیری و سیل‌خیزی حوضه آبریز قلعه‌چای می‌باشد. در رابطه با پهنه‌بندی خطر سیلاب بالغ بر ۷/۷ درصد از محدوده حوضه مطالعاتی از خطرپذیری بسیار زیاد و ۱۳ درصد آن از خطرپذیری زیادی برخوردار می‌باشد. دلیل اساسی که باعث افزایش خطر سیلاب در سطح حوضه آبریز قلعه‌چای شده است مربوط به مکان‌گزینی اکثر روستاهای منطقه در مجاورت بلافصل آبراهه‌های اصلی حوضه می‌باشد. در واقع، شرایط ژئومورفولوژیکی و توپوگرافی بسیار ناهموار و خشن منطقه باعث شده است که دشت‌های سیلابی کم‌عرض مجاور آبراهه‌های اصلی حوضه بستر سکنی‌گزینی و فعالیت‌های کشاورزی منطقه واقع گردد. در همین رابطه، شبیه‌سازی بارش- رواناب در سطح حوضه آبریز قلعه‌چای نشان داد که بارش‌های با دوره بازگشت کمتر از ۱۰ سال و تاحدودی کمتر از ۱۵ سال مخاطره‌ای را متوجه جوامع انسانی ساکن حوضه نمی‌کند. با این حال، بارش‌های با دوره بازگشت بالاتر- مخصوصا بیشتر از ۲۵ سال- می‌توانند در مقیاس محلی منجر به سیلاب‌های مخرب شوند. بدین ترتیب در پهنه‌های سیل‌گیر می‌بایست با اقدامات غیرسازه‌ای (مخصوصا برنامه‌ریزی کاربری اراضی) و سازه‌ای (مانند احداث سیل‌بندها) نسبت به کاهش مخاطره سیلاب اقدام نمود. یکی از اقدامات بنیادی برای مهار و مدیریت خطر سیلاب شناسایی پهنه‌هایی از حوضه است که با تولید رواناب بیشتر منشا اصلی سیلاب‌های پایین‌دست حوضه می‌باشند. در پژوهش حاضر این امر با ترکیب مدل HEC-HMS و GIS صورت گرفته و به نتایج منطقی نیز منجرگردید.

منابع

- فتحعلی‌زاده، ب.، عابدینی، م، و رجبی، م.، ۱۳۹۹. بررسی علل وقوع سیلاب و مخاطرات آن در حوضه آبریز زنوزچای با استفاده از مدل هیدرولوژیکی *HEC-HMS* و منطق فازی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۹، شماره ۱، پیاپی ۳۳، صص ۱۳۴-۱۵۵.
- قنواتی، ع.، ۱۳۹۲. پهنه‌بندی خطر سیلاب شهر کرج با استفاده از منطق فازی، مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال ۲، شماره ۸، صص ۱۱۳-۱۳۲.
- قنواتی، ع.، بابائی‌اقدم، ف.، همتی، ط، و رحیمی، م.، ۱۳۹۴. پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری با استفاده ازمدل منطق فازی در محیط *GIS* (مطالعه موردی حوضه رودخانه خیاوچای مشکین شهر)، نشریه هیدروژئومورفولوژی، دوره ۱، شماره ۳، صص ۱۲۱-۱۳۵.
- مدرسی، ف.، و عراقی نژاد، ش.، ۱۳۹۶. آموزش کاربردی مدل سازی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز در *HEC-HMS*، انتشارات نشر نوآور.
- موسوی، س. م.، نگهبان، س.، رخشانی مقدم، ح، و حسین‌زاده، س. م.، ۱۳۹۵. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیل-خیزی با استفاده از منطق فازی *TOPSIS* در محیط *GIS* (مطالعه موردی: حوضه‌ی آبخیز شهر باغملک)، مجله مخاطرات محیط طبیعی، سال پنجم، شماره ۱۰، صص ۷۹-۹۸.
- *Alcántara-Ayala, I. and Goudie, A.S., 2010. Geomorphological Hazards and Disaster Prevention. Cambridge University Press.*
- *Alkema, D., 2004. RS and GIS applications in flood forecasting. Proceedings of the National Workshop on Flood Disaster Management: Space Inputs. India. 57-59.*
- *Djokic, D., 2008. Comprehensive terrain preprocessing using arc hydro tools, no 5, p 61.*
- *Esri., 2019. ArcGIS Desktop Help.*

- *Feldman, A.D., 2000. Hydrologic modeling system HEC-HMS technical reference manual, p 155, March.*
- *Ghosh, S. N., 2014. Flood control and drainage engineering. Fourth edition. CRC Press/Balkema.*
- *Iwahashi, J. and Pike, R.J., 2007. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. Geomorphology, Vol. 86, pp. 409–440.*
- *Kabiri, R., 2014. Simulation of runoff using modifies SCS-CN method using GIS system, case study: Klang watershed in Malaysia. Res J Environ Sci 8(4):178–192.*
- *Knebl, M.R., Yang, Z-L., Hutchison, K. and Maidment, D.R., 2005. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio river basin summer 2002 storm event. J Environ Manag 75(4):325–336.*
- *Lai, C., Chen, X., Chen, X., Wang, Z., Wu, X. and Zhao, S., 2015. A fuzzy comprehensive evaluation model for flood risk based on the combination weight of game theory. Natural Hazards 77, 1243-1259.*
- *Lee, S., 2007. Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping, Environ Geol 52, pp: 615–623.*
- *Li, Z., 2014. Watershed modeling using arc hydro based on DEMs: a case study in Jackpine watershed. Environ Syst Res 3(1):11*
- *Mukungu Mukolwe, M., 2016. Flood hazard mapping: uncertainty and its value in the decision-making process. CRC Press/Balkema.*
- *Nandalal, H.K. and Ratnayake, U.R., 2011. Flood risk analysis using fuzzy models. Journal of Flood Risk Management 4, 128-139.*
- *Oleyiblo, J., 2010. Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China. Water Sci Eng 3(1):14–22.*
- *Schanze, J., Zeman, E. and Marsalek, J., 2004. Flood risk management: hazards, vulnerability and mitigation measures. Springer.*
- *Scharffenberg, WA., 2013. Hydrologic modeling system HEC-HMS-user's manual, p442, December.*
- *Şen, Z., 2018. Flood modeling, prediction, and mitigation. Springer.*
- *Sönmez, O. and Bizimana, H., 2020. Flood hazard risk evaluation using fuzzy logic and weightage based combination methods in Geographic Information System (GIS). Sharif University of Technology Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering 27, 517-528.*
- *Stein, S. and Stein, J., 2014. Playing Against Nature: Integrating Science and Economics to Mitigate Natural Hazards in an Uncertain World. John Wiley & Sons.*
- *U. S. Army Corps of Engineers, USACE., 2010. HEC-GeoHMS geospatial hydrologic modeling extension, Version 5.0 - User's Manual. Davis, CA, pp 1–6.*
- *Van Herk, S., 2014. Delivering Integrated Flood Risk Management: Governance for collaboration, learning and adaptation. CRC Press/Balkema.*
- *Wang, H., Yun, R., Zhao, R. and Qi, Zhen., 2019. Flash flood risk evaluation based on variable fuzzy method and fuzzy clustering analysis. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, vol. 37, no. 4, pp. 4861-4872.*
- *Warner, J., 2011. Flood planning, the politics of water security. I.B.Tauris & Co Ltd.*
- *Winsemius, H. C., Aerts, J. C. J. H., van Beek, L. P. H., Bierkens, M. F. P., Bouwman, A., Jongman, B., Kwadijk, J. C. J., Ligtvoet, W., Lucas, P. L., van Vuuren, D. P. and Ward, P. J., 2015. Global drivers of future river flood risk. Nature Clim. Change, advance online publication.*