

پیش‌بینی واکنش‌های هیدرولوژیکی به تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه آبریز گرگان رود)

فریبا پاکنژاد - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
عزت‌اله قنوتی* - دانشیار ژئومورفولوژی دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
علی احمد آبادی - دانشیار ژئومورفولوژی دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۴ تأیید نهایی: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

چکیده

تغییر کاربری زمین و پوشش زمین تأثیر مستقیمی بر سطح پایین دست حوضه زهکشی دارد، از این رو فرآیندهای بارش‌رواناب را تغییر می‌دهد و روی هیدروگراف سیل اثر گذار است. این مطالعه روش استفاده از مدل CA-Markov را برای پیش‌بینی استفاده از زمین توزیع شده در حوضه رودخانه گرگان رود در سال ۲۰۴۰ بر اساس تکامل تاریخی توصیف می‌کند. در این پژوهش، نقشه‌های کاربری اراضی حوضه گرگان رود برای سه دهه گذشته (۱۹۸۶، ۲۰۰۶، ۲۰۲۰) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای زمین و با تکنیک سنجش از دور استخراج و تحلیل شده است. سپس تغییرات کاربری اراضی آبی برای سال ۲۰۴۰ با استفاده از مدل یکپارچه CA-Markov با توجه به سناریوی تداوم فرآیند مدیریت فعلی شبیه‌سازی شده است. منحنی‌های شدت-مدت-فرکانس (IDF) در سه دوره زمانی به صورت دوره تاریخی (۱۹۸۰-۱۹۹۹ در)، دوره اخیر (۲۰۰۰-۲۰۲۰) و دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) تحت شرایط تغییر اقلیم، استخراج و تغییرات آنها مورد بررسی قرار گرفت. برای شرایط آینده از مدل CAMS-CSM1-0 از مجموعه مدل‌های CMIP6 برای دو سناریو خوشبینانه (SSP2-5) و بدبینانه (SSP-5-8.5) استفاده شده است. سپس مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای بررسی تأثیر تغییر کاربری زمین بر پاسخ‌های هیدرولوژیکی حوضه زهکشی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج پیش‌بینی مدل CA-Markov حاکی از کاهش ۱۳/۸۹٪ اراضی جنگلی از سال ۲۰۲۰ تا سال ۲۰۴۰ می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی سیلاب در سال ۲۰۴۰ با فرض ثابت بودن بارش و در نظر گرفتن تغییرات کاربری اراضی، دبی اوج به میزان ۵۱/۱۱، نسبت به سال ۲۰۲۰ افزایش می‌یابد و همچنین حجم سیلاب ۵۳/۸۸٪، نسبت به سال ۲۰۲۰ افزایش خواهد داشت. با بررسی هیدروگراف دبی در دوره بازگشت‌های مختلف، برای سه سناریو بارشی مشخص شد بارش و تغییرات کاربری نقش موثری در افزایش دبی اوج و حجم سیلاب داشته است با توجه به کاهش ۲۴ درصدی بارندگی در سناریو سوم (۲۰۲۱-۲۰۴۰) نسبت به سناریو اول، دبی اوج در این سناریو برای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله به میزان ۳/۹۶٪، نسبت به سناریو اول افزایش داشته است. شبیه‌سازی بارش‌رواناب یک گام اساسی در تجزیه و تحلیل تأثیرات حوادث شدید سیل است. این می‌تواند به مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب در مناطقی که مستعد سیل هستند کمک کند.

واژگان کلیدی: سیلاب، مدل یکپارچه CA-Markov، مدل هیدرولوژیکی، حوضه گرگان رود

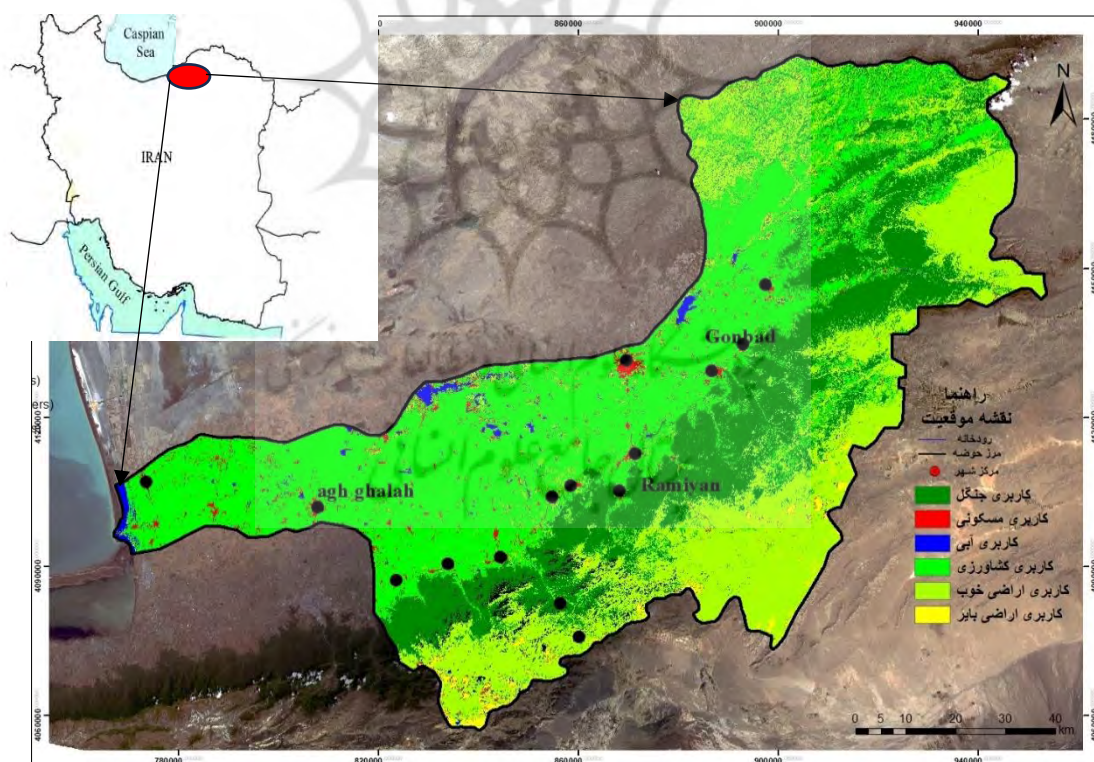
مقدمه

وضعیت سطح زیرین یک حوضه زهکشی عامل مهمی است که بر شکل‌گیری و شدت سیلاب‌ها تاثیر می‌گذارد (شن و همکاران، ۲۰۱۷). اگرچه دگرگونی محیطی زمین توسط فعالیت‌های انسانی در اواخر پلیستوسن آغاز شد، اما با ظهور کشاورزی و جوامع شهری این دگرگونی افزایش یافت (استفنز و همکاران، ۲۰۱۹). بنابراین منجر به یک الگوی قابل مشاهده در تغییر کاربری زمین پوشش زمین (LULC) در طول زمان شده است (خالید و همکاران، ۲۰۲۰). تغییر کاربری/پوشش زمین (LULC) نه تنها محصول ساختار زمین‌شناسی، ارتفاع و شیب، بلکه ساختارهای اجتماعی-اقتصادی و نهادی نیز می‌باشد (نیکو و همکاران، ۲۰۲۰). شاخص‌های هیدرولوژیکی که بخشی از پارامترهای اکولوژیکی را نشان می‌دهند، اغلب توسط فرآیندهای طبیعی یا مصنوعی مانند تغییر اقلیم و تغییر کاربری زمین تغییر می‌یابند. تغییر کاربری زمین ممکن است بر روی پوشش، تبخیر و تعرق و نفوذ تأثیر بگذارد و در نهایت باعث بلایای مانند خشکسالی، سیل یا مشکلات زیست محیطی شود (جبرمیکل و همکاران، ۲۰۱۳). استان گلستان به سبب وقوع سیل‌های تاریخی و مخرب، متحمل تلفات جانی و مالی بیشمار گردیده است. هجوم جریان رواناب‌های سطحی و سیلاب به اراضی گسترده و پهناور استان، ظرفیت پایین ذخیره و عدم هدایت سیلاب به مخازن طبیعی و مصنوعی امن و نیز شرایط زهکشی نامناسب موجب آبگرفتگی و زهدار شدن و بروز خسارت شده است (شهابی و همکاران، ۱۳۹۸). و نیاز است تا راهکارهای مدیریتی کارآمد در این خصوص برای منطقه لحاظ شود. پیش‌بینی تغییرات پوشش اراضی روشی مفید برای دستیابی به یک دید کلی برای مدیریت بهتر منابع طبیعی و حفاظت از اراضی کشاورزی در مناطق شهری است و در انجام اقدامات بلندمدت بسیار موثر است (وارگا و همکاران، ۲۰۱۹). مدل‌های (LULC) برای ارزیابی تغییرات آبی که از تصمیم‌گیری برنامه‌ریزی و کاربری زمین پشتیبانی می‌کنند، توسعه یافته‌اند (فنگ و همکاران، ۲۰۲۰). مدل مارکوف مدلی است که در آن وضعیت آینده یک سیستم را می‌توان صرفاً بر اساس وضعیت قبلی پیش‌بینی کرد. مدل CA-Markov یکی از پرکاربردترین مدل‌های توسعه یافته CA با رویکرد مدل تبدیل مکانی-زمانی بوده است (هانا و همکاران، ۲۰۰۹) و در پیش‌بینی و شبیه‌سازی تغییرات کاربری زمین در بسیاری از کشورها مانند ایالات متحده (سودی و همکاران، ۲۰۱۳)، برزیل (بسنی و همکاران، ۲۰۱۶)، پرتغال (اریا و همکاران، ۲۰۱۰) استفاده شده است. مدل مارکوف برای درک ماهیت تصادفی و پایداری کاربری زمین و پوشش زمین (LULC) بسیار خوب و مفید است (موندال و همکاران، ۲۰۱۶)، جایی که توصیف تغییرات و فرآیندها در زمین دشوار است، تجزیه و تحلیل زنجیره مارکوف یک رویکرد مدلسازی تصادفی است که به طور گسترده در مطالعه پویا تغییر کاربری زمین در مقیاس‌های مختلف، به ویژه مطالعات در مقیاس بزرگ استفاده می‌شود (فان و همکاران، ۲۰۰۸). توانایی مدل برای ادغام داده‌های زمین‌فضایی و سنجش از دور و داده‌های بیوفیزیکی و اجتماعی-اقتصادی، شبیه‌سازی جامع‌تری از تغییرات (LULC) از الگوها به فرآیندها را ممکن می‌سازد (متهودی و همکاران، ۲۰۲۱). متعددی در زمینه مدل CA-Markov در شبیه‌سازی (LULC) و مدل‌های هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی سیلاب برای اهداف مختلف به کار گرفته شده است، که می‌توان به پژوهش‌های زیر اشاره کرد: تودون وادا و همکاران (۲۰۱۴) تغییرات پوشش جنگلی را در نامیبیا، در نیجریه، طی سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۰ را تجزیه و تحلیل کرد و با استفاده از مدل‌های GIS و RS و مدل زنجیره مارکوف، پیش‌بینی ۲۱ سال آینده را ارائه کرد. نتایج نشان می‌دهد که سطح جنگل‌های منطقه به دلیل فعالیت‌های انسانی از جمله برداشت‌های غیرمجاز و کشاورزی در حال کاهش است. نیگوسی و آلتونکیناک (۲۰۱۶) از مدل رشد شهری SLEUTH و مدل هیدرولوژیکی HEC-1 برای ارزیابی تأثیر شهرنشینی بر پاسخ هیدرولوژیکی تحت چهار سناریوی کاربری زمین در حوضه آیاماما استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین اوج سیل و کوتاه‌ترین زمان اوج در حوضه آبخیز آیاماما در سناریوی شهرنشینی نامحدود قرار گرفت. الحسنوی (۲۰۱۶) با استفاده از منحنی‌های شدت-مدت-فرکانس (IDF) به مدل هیدرولوژیکی نیمه توزیع شده HEC-HMS برای شبیه‌سازی جریان ساعتی معرفی شدند که با نمونه مشاهده شده مقایسه شدند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که مقدار مشاهده‌شده با مقادیر به‌دست‌آمده از روش فوق، همانطور که توسط ضریب همبستگی

و نش-ساتکلیف نشان داده شده است، همبستگی مثبت دارد. حاماد و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی تغییرات کاربری زمین را با استفاده از مدل سلولی CA-Markov (CA) برای سال ۲۰۲۳ شبیه‌سازی کردند. و نتایج حاکی از روندی مثبت به سمت مناطق پایدار و همگن در آینده است. یوگنگو و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از مدل های مدل CA-Markov و مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS به بررسی تأثیر تغییر کاربری زمین بر پاسخ‌های هیدرولوژیکی حوضه گین‌های پرداختند و نتایج نشان داد که افزایش بیشتر شهرنشینی منجر به تغییر بیشتر اوج سیل و تغییر حجم می‌شود. برای سیل‌های مقیاس کوچک، زمانی که نسبت استفاده از زمین شهری به طور فرضی ۳۰ تا ۶۰ درصد افزایش می‌یابد، افزایش نسبی پیک‌های سیل از ۴٫۷ درصد به ۸٫۱ درصد با افزایش ۴ تا ۶٫۶ درصد در حجم سیل افزایش می‌یابد. رابن و همکاران (۲۰۲۰) با تحلیل و پیش‌بینی دینامیک کاربری زمین و پوشش زمین از طریق شبیه‌سازی‌های مدل CA-Markov در چین به این نتیجه رسیدند که، به طور کلی، علفزار، زمین‌های زراعی و جنگلی به ساخت و ساز تبدیل شده‌اند. فخارانی^۱ و همکاران (۲۰۲۱) طی پژوهشی به تجزیه و تحلیل مورفومتریکی و ارزیابی خطرات سیلاب‌های سریع برای حوضه‌های زهکشی جنوب غربی سینا، مصر پرداختند. آنها در پژوهش حاضر برای برآورد هیدروگراف پیک جریان سیلاب حوضه و زیر حوضه‌ها از مدل (HEC-HMS) و مدل هیدرولیک (WMS) استفاده کردند و نتایج نشان داد همه زیر حوضه‌های مورد مطالعه دارای RB کم و فرکانس جریان در آنها بین ۰/۷ تا ۰/۹۴ می‌باشد. رویکرد هیدروگراف واحد SCS نتایج نشان داد که تمام زیر حوضه‌های مورد مطالعه دارای RB پایین هستند. ونگ و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی شبیه‌سازی تغییر کاربری و پوشش زمین در یک منطقه خشک با مدل مارکوف به این نتیجه رسیدند که (LULC) طی ۳۰ سال آینده به طور چشمگیری تغییر خواهد کرد. در ایران نیز در این زمینه پژوهش‌های متعددی انجام شده است از جمله می‌توان به مطالعه ایلدرمی و همکاران (۱۳۹۴) با بررسی تغییرات کاربری اراضی به روش مارکوف پرداختند که نتایج پژوهش آنان نشان دهنده افزایش ۵/۷۷ درصدی مساحت جنگل و کاهش ۶/۳ درصدی مراتع تا سال ۱۳۴۲ بود. احمد آبادی و همکاران (۱۳۹۵) اثرات تغییر اقلیم را بر خصوصیات هیدروژئومورفولوژی حوضه کن بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که جریانات و رواتاب سطحی با افزایش اراضی شهری در دوره آینده افزایش دارد. قنوتی و همکاران (۱۳۹۵، ۲۰۱۴) با بررسی پتانسیل سیلاب در حوضه آبریز درکه با استفاده از روش بارش‌رواناب SCS به این نتیجه رسیدند که قسمت جنوبی حوضه با توجه به از بین رفتن پوشش گیاهی، گسترش شهر از جنوب، تغییر کاربری زمین و شکل حوضه که به صورت کشیده است، احتمالاً رخداد سیلاب بیشتر از سایر نقاط است. زهتابیان و همکاران (۱۳۹۵) اشاره کرد پژوهش آنها بیانگر تغییرات کاربری اراضی به سمت کاربری کشاورزی در سال ۱۳۴۲ بود. یمانی و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از مدل هیدرولوژیکی به پیش‌بینی سیلاب های تاریخی کشکان پرداختند و نتایج نشان داد که مدل HEC-HMS دارای کارایی بالایی برای شبیه‌سازی رواناب روزانه در دوره تر سالی و همچنین در حداکثر دبی لحظه‌ای سیلاب به ازای دوره بازگشت‌های کمتر از ۳۰۰ سال را دارد. هدف پژوهش حاضر ارزیابی تغییرات کاربری اراضی حوضه گرگان رود با کمک تصاویر ماهواره‌ای برای سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۰ و مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات زمین با استفاده از مدل CA-Markov تا سال ۲۰۴۲ و تجزیه و تحلیل تکامل تاریخی آن از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۰ (یعنی دوره پایه) و پیش‌بینی روند مشاهده شده برای دوره آینده ۲۰۲۱-۲۰۴۰ است و استفاده در مدل‌های هیدرولوژیکی مبتنی بر HEC-HMS می‌باشد تا تأثیر تغییر کاربری پیش‌بینی‌شده و سنتر شده روی مقادیر سیل‌های تاریخی معمولی را بررسی کند. و در نهایت با استخراج دوره های بازگشت برای سناریوهای مختلف بارشی این تغییرات را ارزیابی کند.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

این حوضه در محدوده مختصات $36^{\circ}35'05''$ تا $38^{\circ}15'19''$ عرض شمالی و $54^{\circ}10'40''$ تا $54^{\circ}26'55''$ طول شرقی قرار گرفته است. گرگانرود با طول حدود ۳۰۰ کیلومتر و حوضه آبخیزی به مساحت ۱۰۲۵۰ کیلومترمربع از دامنه‌های شمالی البرز شرقی و دامنه‌های غربی استان خراسان شمالی از رشته‌کوه آلاداغ در بجنورد سرچشمه گرفته و وارد منطقه کلاله شده و پس از طی ۲۰۰ کیلومتر و گذشتن از نواحی گوکلاننشین ترکمن صحرا وارد دشت گرگان شده و در نزدیکی بندر ترکمن به دریای خزر می‌ریزد (صراف و همکاران، ۱۳۹۹). رودخانه گرگانرود از میان شهر آق قالا گذشته و بافت اصلی این شهر در دو طرف رودخانه یعنی شمال و جنوب آن گسترش پیدا کرده است و برای ارتباط طرفین شهر چند پل روی رودخانه گرگانرود احداث گردیده است. شکل (۱) میانگین بارندگی نقاط گوناگون آن متفاوت بوده و میانگین دمای سالانه از صفر درجه سانتی‌گراد در ارتفاعات البرز تا بالای ۱۷/۵ درجه در بخش‌های شمالشرقی حوضه متفاوت است. از نظر زمین‌شناسی تشکیلات حوضه گرگان رود شامل؛ شن، ماسه‌سنگ قرمز، کامبرین اردویسین، آهک و آهک شیبستی دونین، پرمین، ژوراسیک و کرتاسه، ماسه سنگهای آهکی ترسیر بوده و مهمترین آن تشکیلات کواترنری دوران چهارم می‌باشد که اکثر دشت حوضه گرگان رود را در بر می‌گیرد. از نظر پوشش گیاهی، ارتفاعات حوضه عمدتاً دارای پوشش گیاهی جنگلی بود و مرتفع‌ترین نقاط حوضه آبخیز گرگان رود از جنگل‌های ارس تشکیل شده است.



شکل ۱. موقعیت محدوده مورد مطالعه (منبع: نگارندگان)

داده‌های مورد استفاده در پژوهش

در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای Landsat TM، Landsat ETM+ و TIRS OLI به ترتیب مربوط به سال‌های ۱۹۸۶، ۲۰۰۶ و ۲۰۲۰ برای طبقه‌بندی و بررسی تغییرات کاربری اراضی در حوضه گرگان رود استفاده شده است. علت انتخاب این تصاویر قدمت سری‌های زمانی و توان تفکیک طیفی و مکانی بالا و هم‌چنین در دسترس و رایگان بودن این تصاویر می‌باشد. جهت پردازش تصاویر و تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار ENVI 5.6 و به منظور اخذ خروجی از پردازش‌های انجام شده تصاویر، از نرم‌افزار ARCGIS 10.7 استفاده شد. از نرم‌افزار ENVI 5.6 برای طبقه‌بندی تصاویر مورد نظر از روش الگوریتم Random Forest (جنگل تصادفی) و با استفاده از افزونه‌ی EnMap-Box 2.2 استفاده شد. از نرم‌افزار TERRSET 2020 جهت مدلسازی تغییرات استفاده شد. و برای ارزیابی صحت و دقت طبقه‌بندی و نیز مقایسه نتیجه طبقه‌بندی با واقعیت زمینی از ضریب کاپا استفاده شد.

شبیه‌سازی CA-Markov

مدل مارکوف به طور گسترده در مدل‌سازی بوم‌شناختی استفاده می‌شود (براون و همکاران، ۲۰۰۰). زنجیره مارکوف یک مدل تصادفی است که در آن می‌توان وضعیت یک سیستم در آینده را با توجه به حالت قبلی آن پیش‌بینی کرد (هارت و همکاران، ۲۰۰۶ و به را و همکاران، ۲۰۱۲). تحلیل انواع کاربری زمین، روندها و ابعاد تغییرات (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۸). دو مدل معرف مدل زنجیره مارکوف (مولر و میدلتون، ۱۹۹۴) و مدل CA (اتوماتای سلولی) مارکوف هستند. در رابطه ۱ مدل همگن مارکوف برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی به صورت معادله ریاضی نشان داده شده است (سودی و همکاران، ۲۰۱۳).

$$l_{t+1} = p_{ij} \times l_{(t)} \text{ And } p_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1M} \\ P_{21} & P_{22} & & P_{M2} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ P_{M1} & P_{M2} & \dots & P_M \end{bmatrix}$$

$$\left(0 \leq P_{ij} < 1 \text{ And } \sum_{j=1}^m p_{ij} = 1, i, j = 1, 2, \dots, m \right)$$
(۱)

در رابطه (۱)، $L(t)$ و $L(t+1)$ به ترتیب حالت‌های کاربری زمین در دوره‌های $t+1$ و t یک ماتریس احتمال انتقال در یک حالت است. به عبارت دیگر، زنجیره مارکوف به عنوان رابطه (۲) از توزیع کاربری زمین در ابتدا (Mt) و پایان یک دوره زمانی گسسته ($Mt+1$) و همچنین از یک ماتریس انتقال (MLC) ایجاد می‌شود که تغییرات رخ داده در دوره زمانی مورد نظر را نشان می‌دهد. با توجه به این پیش‌فرض، تغییر کاربری در یک قطعه زمین بر اساس احتمالات تخمین زده شده و در ماتریس انتقال تخمین زده می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱):

$$\begin{bmatrix} lc_m & lc_{ua} & lc_{uw} \dots \\ lc_{au} & lc_{aa} & lc_{aw} \dots \\ lc_{wu} & lc_{wa} & lc_{ww} \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_t \\ A_t \\ W_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_t \\ A_t \\ W_t \end{bmatrix}$$

$$M_{LC} = M_{mt} = M \quad (2)$$

اتوماتای سلولی (CA) مدلی برای دینامیک فضایی است که به طور گسترده‌ای برای مطالعه تغییرات کاربری زمین استفاده می‌شود (ادیکاری و همکاران، ۲۰۲۱). اتوماتای سلولی شامل مجموعه‌ای از حالت‌ها، فضای سلول و قوانین انتقال است (هانگ و همکاران، ۲۰۲۰). اتوماتای سلولی منظره‌ای را به عنوان شبکه نشان می‌دهد که در آن هر سلول در هر مرحله زمانی T+1 با استفاده از قانون گذار بر اساس وضعیت سلول‌های مجاور در زمان t و طبق قوانین انتقال از پیش تعیین شده به روز می‌شود (عزیزی و همکاران، ۲۰۱۶). وضعیت سلول در مرحله بعدی با توجه به مجموعه‌ای از قوانین انتقال به وضعیت فعلی سلول و همچنین حالت سلول‌های اطراف بستگی دارد (میستاو و همکاران، ۲۰۱۲). اتوماتای سلولی از چهار عنصر تشکیل شده است: فضای سلولی، حالات سلولی، مراحل زمانی و قوانین انتقال با استفاده از اتوماتای سلولی، می‌توان دینامیک سیستم‌های پیچیده را شناسایی کرد و آنها را در قالب قوانین ساده پیشنهاد کرد. سپس، با استفاده از این قوانین، می‌توانیم آینده سیستم را به صورت فضایی مدل‌سازی کنیم (سینگ، ۲۰۰۳). در پژوهش حاضر، مدل زنجیره ای مارکوف CA و مدل اتوماتای سلولی یکپارچه شده‌اند. هر دو مدل‌های گسسته در زمان و مکان هستند. زنجیره مارکوف هیچ دانشی در مورد توزیع فضایی تصادفی در هر گروه کاربری زمین اضافه نمی‌کند (بهره و همکاران، ۲۰۱۲). قوانین انتقال برای ماژول MARKOV_CA در نرم افزار TERRSET2020 در قالب نقشه‌های تناسب براساس ارزیابی چند معیاره تنظیم شد.

منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی (IDF)

بل و چن روابطی برای منحنی‌های IDF در امریکا ارائه نمودند. بل طی تحقیقاتی که انجام داد روابطی برای منحنی‌های IDF ارائه کرد که تابعی از بارش یک ساعته با دوره بازگشت ساله P_1^{10} بود. که این روابط برای شرایط هیدرومتئورولوژی خاصی صادق بوده و برای حوضه‌های دیگر نیاز به واسنجی دارند. معادله متداول برای منحنی‌های IDF به شرح زیر می‌باشد:

$$I = A/D + B \quad (3)$$

در رابطه فوق I شدت بارش (میلیمتر بر ساعت) D دوام و مدت بارش (دقیقه)، A، B و E ضرایب ثابت می‌باشند که به شرایط هیدرومتئورولوژی بستگی دارند. کوستویانیس و مانتاس یک رابطه جامع برای منحنی‌های IDF ارائه کردند که بصورت زیر می‌باشد:

$$I = \frac{W}{(D + \theta)^\eta} \quad (4)$$

در رابطه فوق، I: شدت بارش، D: دوام بارش، W، θ ، η : ضرایب ثابت غیر منفی می‌باشند. طبق مطالعات صورت گرفته توسط کوستویانیس و مانتاس، در رابطه فوق θ و η تقریباً مستقل از دوره بازگشت بوده ولی ضریب W تابعی از دوره بازگشت می‌باشد. بطور کلی براساس روابط ارائه شده برای منحنی‌های IDF، می‌توان رابطه کلی زیر را تعریف کرد:

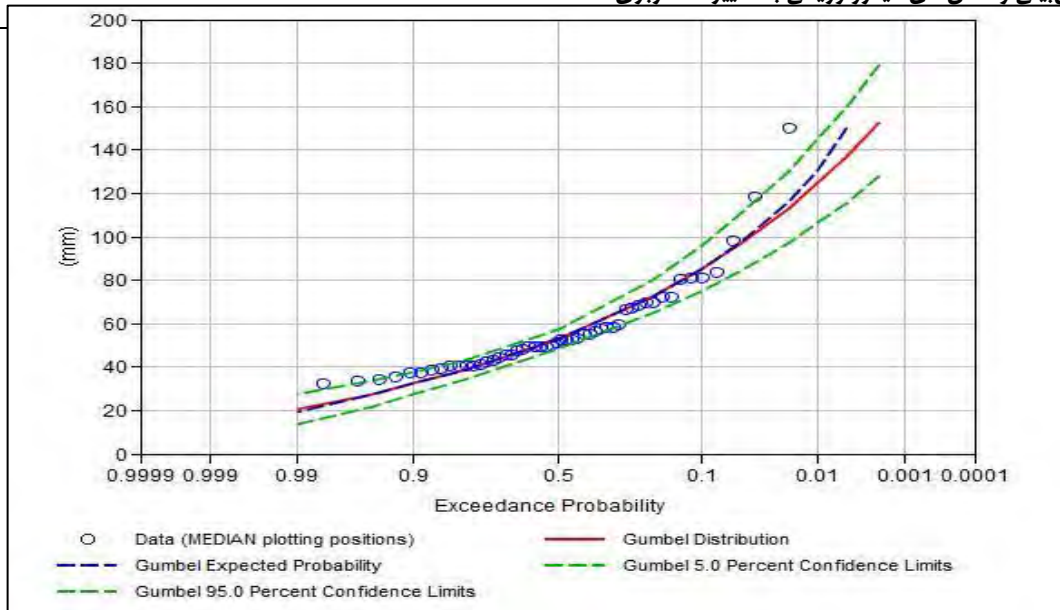
$$I = \frac{A(T)}{B(D)}$$

(۵)

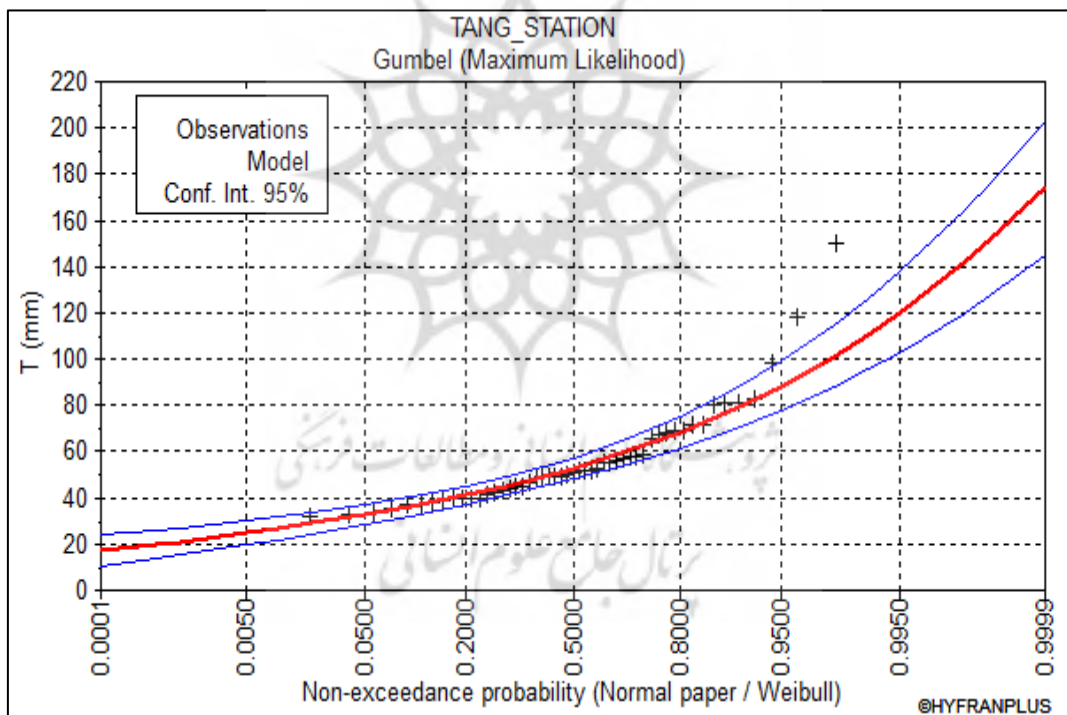
در رابطه ۵ A(T) و B(D) به ترتیب توابعی از دوره‌ی بازگشت (T) و دوام بارش است.

برای ساخت منحنی‌های IDF به روش متداول ابتدا داده‌های حداکثر سالانه بارش برای تداوم‌های مختلف از روی آمار ثبت شده استخراج می‌گردد در مرحله بعد برای داده‌های بارش حداکثر سالانه در تداوم معین مثلاً ساعتی، یک توزیع احتمالی مثل توزیع گامبل، لگ نرمال، ... برازش داده می‌شود که برای نکویی برازش نیز از آزمون‌های آماری مثل آزمون مای اسکور و آزمون گشتاورهای خطی استفاده می‌شود. سپس از روی توزیع احتمالی برازش داده شده به داده‌های حداکثر سالانه در تداوم مورد نظر، مقدار بارش در همان تداوم به ازای دوره بازگشت مورد نظر برآورد می‌شود. این روند برای تمامی تداوم‌های انجام شده و در نهایت به داده‌های بارش در تداوم‌های مختلف که دوره بازگشت یکسانی (T) دارند یک منحنی که معمولاً توانی باشد برازش داده می‌شود که این منحنی IDF در همان دوره بازگشت (T) خواهد بود. این مرحله برای دوره بازگشت‌های مختلف تکرار می‌گردد.

با توجه به تکمیل بودن داده‌های ثبت شده در ایستگاه هواشناسی گنبد در طول دوره ۱۹۸۳ تا ۱۹۹۹ که پایه استخراج منحنی‌های شدت-مدت-فروانی موجود در سازمان هواشناسی کشور است با استفاده از نرم افزارهای HyfranPlus، و HEC-SSP 2.2، فرایند پردازش در سه دوره تاریخی (۱۹۸۰-۱۹۹۹)، دوره اخیر (۲۰۰۰-۲۰۲۰) و دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) انجام و توابع احتمالی حداکثر شدت‌های بارندگی برای تداوم‌های مختلف (۱۴۴۰، ۷۲۰، ۱۲۰، ۶۰، ۳۰، ۱۵، ۱۰، ۵) دقیقه‌ای برازش داده شد. جدول (۷، ۸، ۹) توزیع احتمالاتی گامبل برای داده‌های حداکثر بارش سالانه سه دوره انتخاب شد و دقت آن با دو نرم افزار سنجیده شد. شکل (۲) دقت شدت بارندگی ۱۰ دقیقه‌ای بین ۸۰ تا ۱۶۰ میلی متر در ساعت برای دوره‌های بازگشت ۲ و ۱۰۰ ساله متغیر است. شکل (۳) منحنی‌های IDF کمک مفیدی در هنگام طراحی کارهای زهکشی برای هر پروژه‌ای هستند و طراحی اقدامات ایمن و اقتصادی کنترل سیل را تسهیل می‌کنند. (الفی، ۲۰۱۶) برای پیش بینی تحت شرایط تغییر اقلیم دوره آینده (۲۰۲۱، ۲۰۴۰) از داده‌های میانگین ایستگاه‌های حوضه گرگان رود از آینده از مدل CAMS-CSM1-0 از مجموعه مدل‌های CMIP6 برای دو سناریو خوشبینانه (SSP2-4-5) و بدبینانه (SSP-5-8.5) استفاده شده است. و بعد از پردازش و آماده سازی داده‌ها و تبدیل آن در متلب و نرم افزار ARC GIS 10.7 منحنی‌های IDF برای دوره آینده نیز تکمیل شد. شکل (۱۲، ۱۳، ۱۴)



شکل ۲. عمق بارش ۲۴ ساعته و احتمال تجمعی (گامبل) برای دوره اخیر در نرم افزار HEC-SSP-2.2



شکل ۳. عمق بارش ۲۴ ساعته و احتمال تجمعی (گامبل) برای دوره اخیر در نرم افزار HyfranPlus

مدل HEC-HMS

نرم افزار HEC-HMS یک نرم افزار مدل سازی هیدرولوژیکی از نوع شبیه سازی است که توسط مرکز مهندسی هیدرولوژیکی ارتش آمریکا تولید شده است (فلدمن و همکاران، ۲۰۰۰). مدل HEC-HMS شامل چهار بخش مدل تحلیلی

برای محاسبه جریان سطحی مانند روند یابی سیل در کانال، روابط گرافیکی پیشرفته اجزای سامانه هیدرولوژیکی با ویژگی تعاملی، سیستمی برای ذخیره و مدیریت داده‌ها و وسیله‌ای برای نمایش و گزارش خروجی‌های مدل است. گام اول در استفاده از مدل HEC-HMS تعریف مساحت حوضه و زیر حوضه‌ها، شبکه آبراهه‌ها و اتصال‌های آنهاست. در مرحله نخست، حجم رواناب، توسط یکی از روش‌های نفوذ به دلخواه محاسبه می‌شود. تلفات بارش توسط روش‌های متفاوت برای هر گام زمانی محاسبه و از کل عمق بارش در آن گام زمانی کسر می‌شود. عمق باقی مانده، به عنوان بارش مازاد در نظر گرفته می‌شود و به طور یکنواخت در سراسر حوضه توزیع می‌شود. سپس، HEC-HMS بارش مازاد را به طور مستقیم و از طریق روش انتقال بارش-رواناب به رواناب تبدیل می‌کنند. در نهایت، روش جریان پایه در آغاز شبیه سازی بارش به عنوان جریان زیر سطحی تاخیری برای رسیدن به آبراهه‌های حوضه اعمال می‌شود (ورما و همکاران، ۲۰۱۰). در این پژوهش از روش واحد مصنوعی SCS، استفاده شده است. در مرحله واسنجی مدل با استفاده از داده‌های بارانسجی، هیدرومتری، داده‌های مربوط به فیزیوگرافی حوضه و CN یا شماره منحنی، روش هیدروگراف واحد مصنوعی SCS (رابطه ۶) بعنوان روش برآورد رواناب حوضه تشخیص داده شد و از این روش در مرحله ارزیابی مدل استفاده گردید برای محاسبه روند یابی سیلاب، و جریان در محدوده رودخانه، از روش ماسکینگام استفاده شد. برای محاسبه رواناب مستقیم از روش خطی و برای محاسبه جریان پایه از منحنی عقب‌نشینی (یا مدل کاهش نمایی) استفاده شد. مقدار CN هر زیرحوضه توسط گروه خاک هیدرولوژیکی انواع خاک در حوضه تعیین می‌شود. گروه‌های هیدرولوژیکی خاک بر اساس تخمین پتانسیل رواناب هستند. خاک‌ها با توجه به حداقل میزان نفوذ به یکی از چهار گروه (A، B، C و D) تقسیم می‌شوند. خاک‌های گروه A بیشترین نفوذپذیری و خاک‌های گروه D کمترین را دارا می‌باشند. در حوضه مورد مطالعه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک در گروه‌های B، C و D قرار گرفته است. در اینجا، بیشترین مساحت حوضه مربوط به گروه هیدرولوژیکی D می‌باشد، انواع خاک و گروه خاک هیدرولوژیکی مربوطه در جدول (۱) نشان داده شده است. با توجه به نوع خاک و نسبت کاربری زمین حوضه رودخانه گرگان رود در دوره‌های مختلف، مقادیر CN زیرحوضه‌ها در سال‌های مربوطه محاسبه شده است. رویدادهای سیل تاریخی در سطوح مختلف شدت (یعنی قله‌ها و حجم) طی سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۰ در حوضه رودخانه گرگان رود در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. مرحله زمانی شبیه سازی روی ۳۵ ساعت تنظیم شد. حوضه به ۲۱ زیرحوضه تقسیم شد و از روش چند ضلعی تیسن برای توزیع بارندگی اندازه گیری شده در هر زیرحوضه استفاده شد. معادله کلی روش عدد منحنی SCS به شرح زیر است: (هاوگینز، ۲۰۰۲)

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + s}$$

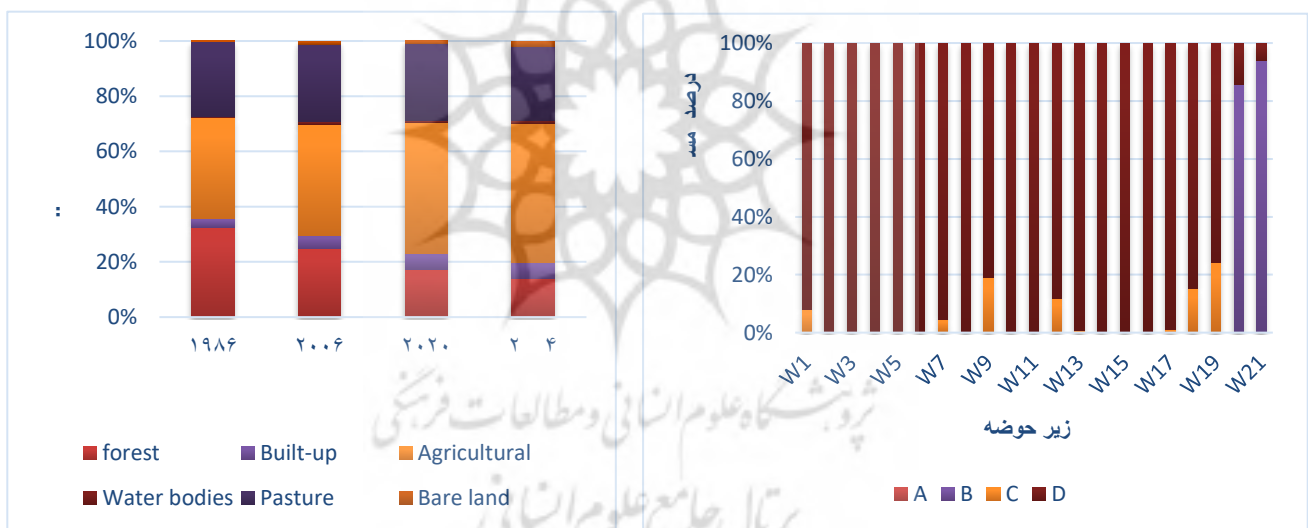
(۶)

در این رابطه Q: مقدار رواناب، P: بارش، S: حداکثر ماندگاری بالقوه پس از شروع رواناب، I_a : تلفات اولیه.

جدول ۱. انواع خاک و گروه خاک هیدرولوژیکی مربوطه در منطقه مورد مطالعه

گروه هیدرولوژی	نوع خاک	نوع خاک در مدل HEC- ردیف
-------------------	---------	-----------------------------

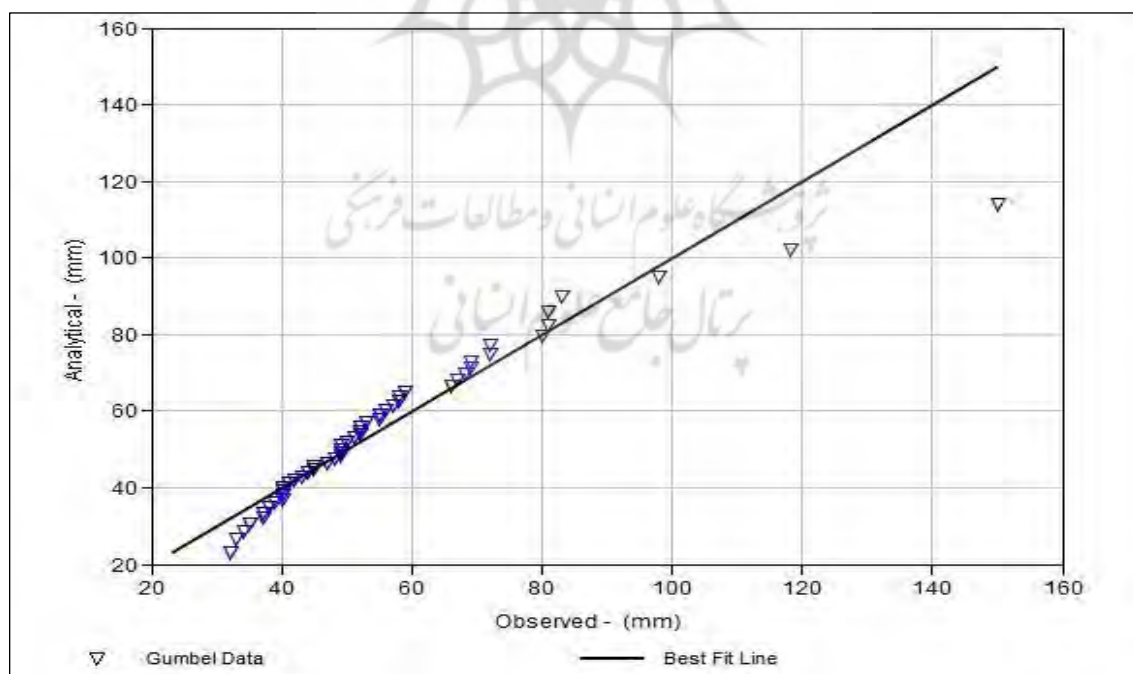
۱	Xh38-3a-4056	CLAY	D
۲	Xh41-3b-4057	CLAY-LOAM	D
۳	Zo26-3a-4133	CLAY	D
۴	I-Rc-Xk-c-3122	LOAM	D
۵	Pg6-2a-3228	LOAM	B
۶	Rc33-3bc-3254	LOAM	D
۷	Xh7-2-3ab-3297	CLAY-LOAM	D
۸	Zo21-3a-3328	CLAY-LOAM	D
۹	Be67-3c-3497	CLAY-LOAM	C
۱۰	I-Rc-Yk-c-3508	LOAM	D
۱۱	Xh32-3ab-3565	CLAY-LOAM	D
۱۲	Be68-3a-3902	CLAY-LOAM	C



شکل ۴. انواع خاک در زیرحوضه و انواع کاربری اراضی سال‌های ۱۹۸۶-۲۰۴۰ در حوضه رودخانه گرگان رود



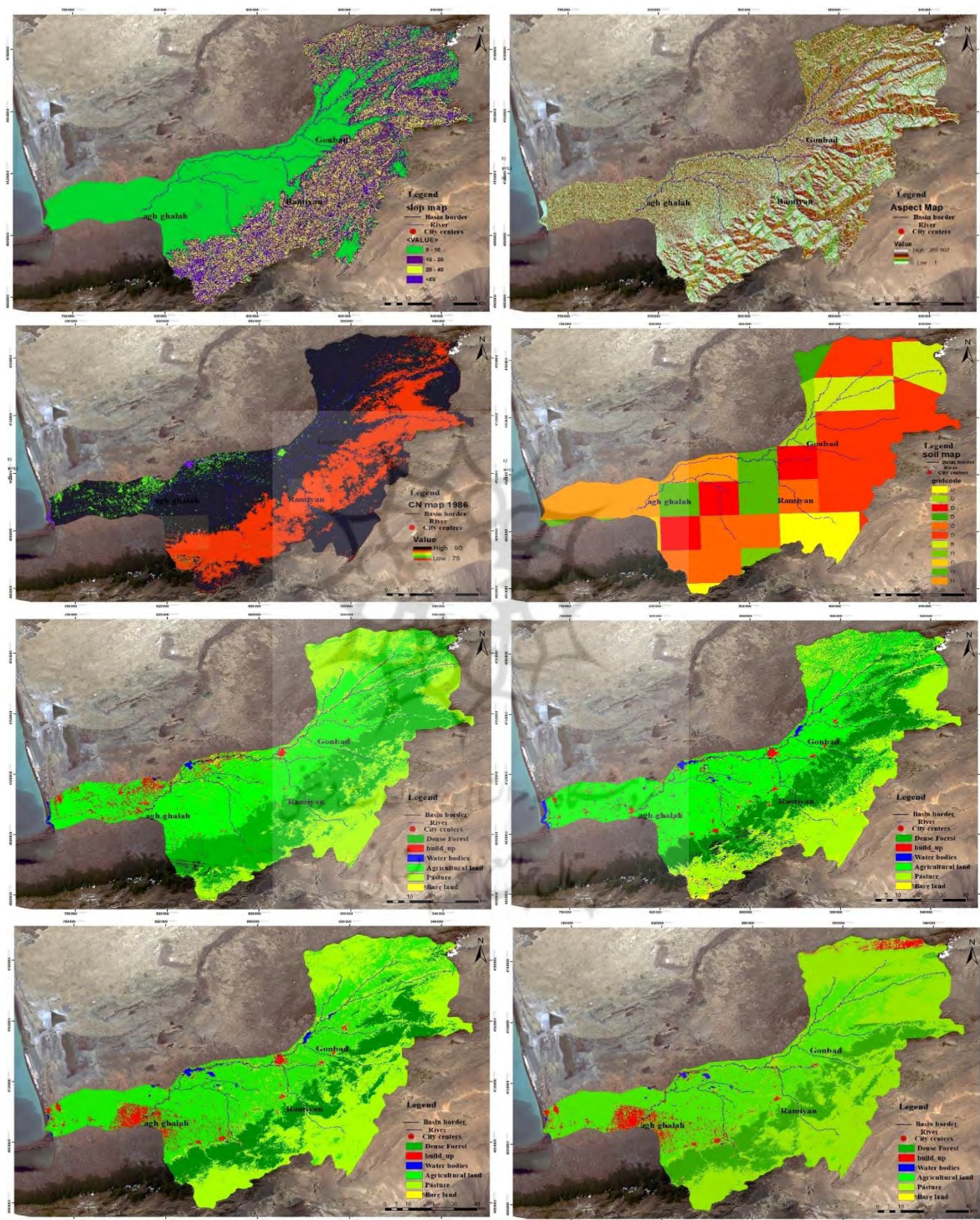
شکل ۵. طرح شماتیک مدل HEC-HMS در حوضه آبریز گرگان رود



شکل ۶. مقایسه داده‌های حداکثر سالانه بارش روزانه مشاهداتی و برآورد شده با توزیع گامبل برای سناریو دوم بارشی (۲۰۰۰-۲۰۲۰)

داده‌های ورودی و روش کلی تحقیق

مدل به داده‌های توپوگرافی، نوع خاک، کاربری اراضی، داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی نیاز دارد. داده‌های توپوگرافی توسط مدل رقومی ارتفاعی (DEM) ۳۰ متر به دست آمد. داده‌های خاک در حوضه رودخانه گرگان رود از پایگاه داده خاک جهانی (<http://soil.geodata.cn>) آماده گردیده است و داده‌های کاربری اراضی از پردازش تصاویر ماهواره‌ای Landsat TM، Landsat ETM+ و TIRS OLI به ترتیب مربوط به سال‌های ۱۹۸۶، ۲۰۰۶ و ۲۰۲۰ برای طبقه‌بندی و بررسی تغییرات کاربری اراضی در حوضه گرگان رود استخراج و جهت ورود به مدل آماده گردیده است. (نتایج آزمون ضریب کاپا بالای ۰/۹۱ است). در مرحله بعد اقدام به تهیه CN حوضه که ارتباط مستقیمی با خصوصیات نفوذ پذیری خاک دارد شد این پارامتر تابعی از چگونگی کاربری و ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک و نوع پوشش گیاهی است. با تلفیق گروه‌های هیدرولوژی خاک، کاربری اراضی و پوشش گیاهی هر ۴ دوره (۲۰۴۰، ۲۰۲۰، ۲۰۰۶، ۱۹۸۶) لایه شماره منحنی CN آماده گردید شکل (۷) و تغییرات آن در مدل HEC-HMS آورده شد. داده‌های هواشناسی شامل بارش روزانه و دما حوضه رودخانه گرگان رود از سال ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۰ از شرکت آب منطقه‌ای گلستان تهیه شد و در دوره اخیر و آینده منحنی‌های IDF بر اساس تغییر اقلیم برای آن برآورد شده است. داده‌های بارندگی بارش روزانه ۹ ایستگاه از جمله دو سد گلستان و وشمگیر در حوضه و در مدل HEC-HMS مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های هیدرولوژیکی رواناب روزانه از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۰ در ایستگاه آق قلا در مرحله کالیبراسیون در رودخانه گرگان رود مورد ارزیابی قرار گرفته شد. شکل (۹و۸) استخراج بارندگی‌های متناظر با سیلاب‌های ثبت شده در تاریخ‌های ۱۹۸۳/۱۲/۱۲، ۲۰۰۱/۸/۱۱، ۲۰۱۹/۳/۲۱، آماده گردید و تهیه آنمود سیل ایستگاه‌های آب سنجی، مرحله بعدی کار پژوهش بود. سپس مقادیر دبی موجود در سیلاب‌های ثبت شده ایستگاه‌های آب سنجی، برای هر واقعه بارندگی استخراج و سپس بارندگی روزانه متناظر با آن واقعه استخراج گردید. برآوردها همراه سایر پارامترها موثر در تولید رواناب جهت شبیه سازی فرایند بارش رواناب و تخمین دبی و حجم در خروجی حوضه وارد مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS گردید. از آنجایی که هدف این مطالعه ارزیابی تأثیر تغییر کاربری زمین، بر روی دبی و حجم سیلاب می‌باشد در یک مرحله با توجه به داده‌های بدست آمده از بارش‌های آینده و منحنی‌های IDF با اثر تغییر اقلیم مدل مورد ارزیابی و در یک مرحله با مقادیر بارش حداکثر با شاخص بارش سال (۱۳۹۸) با سناریوهای تغییر کاربری زمین اراضی بدست آمده از مدل مارکوف و نقشه‌های CN منطقه برای سال ۲۰۴۰ مدل ارزیابی و نتایج با هم مورد بررسی قرار گرفت. از جدول (۶) می‌توان دید که رویدادهای سیل با اندازه‌های مختلف منجر به درجات مختلف افزایش با استفاده پیش بینی شده در سال ۲۰۴۰ شده است.



شکل ۷. نقشه مورد استفاده در مدل HEC HMS به ترتیب از چپ به راست نقشه شیب، جهت شیب، نقشه CN سال ۲۰۴۰، نقشه خاک، نقشه کاربری اراضی (۱۹۸۶، ۲۰۰۶، ۲۰۲۰، ۲۰۴۰)

یافته‌های پژوهش

۳,۱. کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل

۳,۱,۱. مدل CA-Markov

با توجه به تطابق نتایج ارزیابی کاربریها با واقعیت، ضریب کاپای حاصل از ماتریس خلای بدست آمده از مدلسازی و نقشه کاربری اراضی ب دست آمده از تصویر ماهواره‌های سال ۲۰۲۰، مقدار ۰/۹۱ را نشان داد. که شبیه‌سازی تغییر کاربری اراضی به نتایج خوبی دست یافته است و می‌تواند کاربری آینده حوضه رودخانه گرگان رود را پیش‌بینی کند.

جدول ۲. مساحت و درصد طبقات کاربری اراضی در طول به دوره مورد مطالعه (۱۹۸۶، ۲۰۰۶، ۲۰۲۰)

نام کاربری‌ها	۱۹۸۶		۲۰۰۶		۲۰۲۰	
	مساحت (km ²)	% مساحت	مساحت (km ²)	% مساحت	مساحت (km ²)	% مساحت
اراضی جنگلی	۳۳۴۲/۸۰	۶۱/۳۲	۵۲۳۰/۳۰	۲۴/۶۸	۱۸۱۹/۸۷	۱۷/۷۵
مناطق شهری	۳۳۱,۷۰	۳/۲۰	۴۸۷/۱۷	۴/۶۶	۶۰۶/۴۳	۵/۹۰
اراضی کشاورزی	۳۷۴۱,۴۰	۳۶/۵۰	۴۰۹۷/۹۶	۳۹/۹۷	۴۷۴۲/۵۱	۴۶/۲۱
مناطق آبی	۳۵,۸۰	۰,۳۴	۱/۸۴	۱/۰۵	۵/۰۴	۰,۵۴
اراضی با پوشش خوب	۲۷۶۹/۱۱	۲۷/۲۰	۲۸۳۲/۱۱	۲۷/۶۲	۲۹۱۱/۶۷	۲۸/۴۰
اراضی با پوشش بد	۱۸/۲۱	۰,۱۷	۶۵,۱۱۷	۱,۱۴	۱۱۱۱/۱۲	۱/۰۸

جدول ۳. نتایج ارزیابی و اعتبارسنجی کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در سال ۲۰۲۰

نام کاربری‌ها	مشاهداتی (۲۰۲۰)		شبیه‌سازی (۲۰۲۰)		اعتبارسنجی
	مساحت (km ²)	% مساحت	مساحت (km ²)	% مساحت	
اراضی جنگلی	۱۸۱۹/۸۷	۱۷/۷۵	۱۸۱۶/۰۰	۱۷/۷۱	-۰/۰۴
مناطق شهری	۶۰۶/۴۳	۵/۹۰	۵۶۹/۶۰	۵/۵۵	۱/۵
اراضی کشاورزی	۴۷۴۲/۵۱	۴۶/۵۱	۴۷۵۵/۸۵	۴۶/۶۴	-۰/۰۵
مناطق آبی	۵۹/۰۴	-/۵۷	۱۸۴/۷۳	۱/۱۱	۴
اراضی با پوشش خوب	۲۹۱۱/۶۷	۲۸/۱۶	۲۸۰۲/۳۶	۲۷/۰۹	۲/۱
اراضی با پوشش بد	۱۱۱/۱۲	۱/۰۸	۱۰۵/۸۸	۱/۰۳	۱/۳

نام کاربری‌ها	۲۰۴۰	
	مساحت (km2)	% مساحت
اراضی جنگلی	۱۵۶۷/۰۱	۱۵/۲۸
مناطق شهری	۶۳۴/۶۳	۶/۱۹
اراضی کشاورزی	۴۹۹۲/۳	۴۸/۷۰
مناطق آبی	۳۲/۲۷	۰/۳۱
اراضی با پوشش خوب	۳۰۱۰/۲۷	۲۹/۳۶
اراضی با پوشش بد	۶/۴۸	۰/۰۶۳

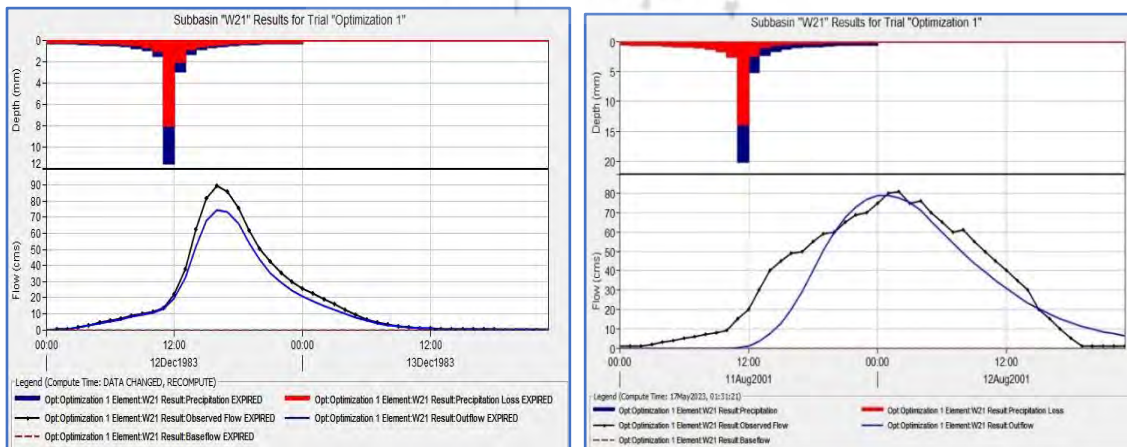
جدول ۴. مساحت و درصد پوشش کاربری اراضی گرگانرود در سال ۲۰۴۰

با مقایسه این نقشه‌ها و جدول به دست آمده نقشه و درصد تغییرات هر کاربری مشخص و محاسبه شد. (شکل ۷) با استفاده از نقشه پوشش و کاربری اراضی تهیه شده برای هر دوره، درصد مساحت و محیط هر پوشش زمین محاسبه شد همچنین درصد هر کاربری نسبت به کل منطقه مورد مطالعه برای آگاهی از میزان تغییرات به وقوع پیوسته در دوره‌های بعدی بدست آمد. نقشه‌های کاربری واقعی و شبیه‌سازی شده برای سال ۲۰۲۰ در شکل (۷) نشان داده شده است. مساحت هر یک از طبقات کاربری واقعی و شبیه‌سازی شده در سال ۲۰۲۰ در جدول (۳) ارائه شده است. جدول مورد نظر نشان می‌دهد که هر سایت کاربری در منطقه خطای کمتر از ۵ درصد دارد. این شکل سودمندی و کاربرد مدل مارکوف را در پیش‌بینی تغییرات استفاده نشان می‌دهد. در این تحقیق بهترین شبیه‌سازی‌ها در مورد طبقه کاربری جنگل انجام شده است. بنابراین مساحت واقعی جنگل ۱۸۱۹/۸۷ کیلومتر مربع و کلاس شبیه‌سازی شده آن ۱۸۱۶/۰۰ کیلومتر است. و میزان خطای آن بسیار ناچیز و ۰/۰۴ درصد برآورد شده است. این در حالی است که شبیه‌سازی کلاس سطوح آبی نسبتاً ضعیف و میزان خطای آن ۴ درصد است. بر اساس موفقیت مدل مارکوف در شبیه‌سازی سال ۲۰۲۰ و استفاده از نقشه پایه کاربر ۱۹۸۶، ماتریس احتمال ۱۹۸۶-۲۰۲۰ و نقشه شبیه‌سازی شده برای سال ۲۰۴۰ انجام شد که در شکل (۷) نشان داده شده است. این کار با توجه به تغییرات رخ داده در دوره (۱۹۸۶-۲۰۰۶) اجرا گردید. جدول (۴)، نشان دهنده مساحت طبقات کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه، در سال ۲۰۴۰ می‌باشد. از جداول (۳ و ۴) می‌توان دریافت که انواع کاربری اراضی مانند، زمین‌های جنگلی از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۴۰ به زمین کشاورزی و اراضی مسکونی تبدیل شدند، اراضی جنگلی از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۴۰ به میزان ۵۳/۱۲٪ کاهش داشته است و اراضی کشاورزی و شهری به تریب در همین دوره به میزان ۳۲/۴۳، ۹۱٪ افزایش داشته‌اند.

مدل HEC-HMS

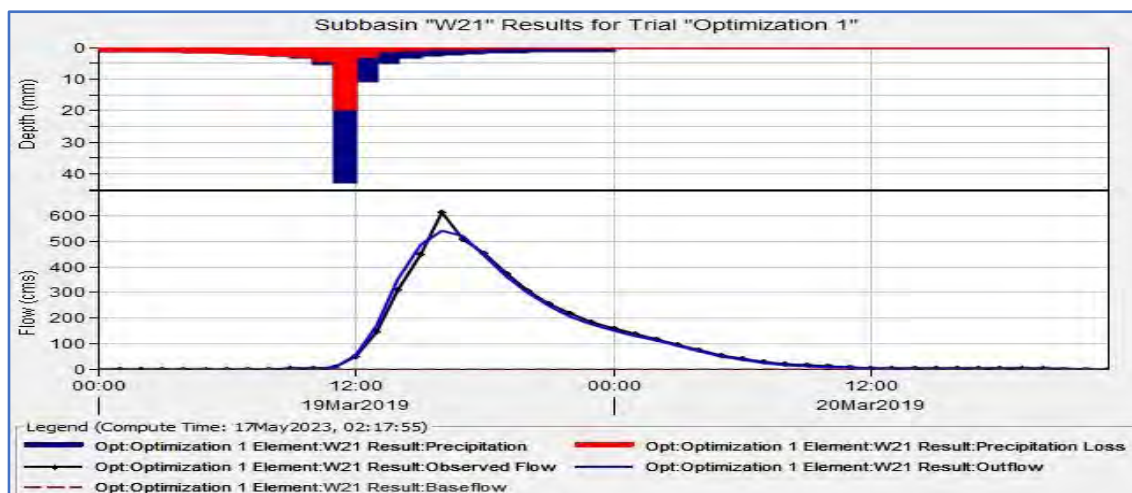
با توجه به کاربری حوضه و وضعیت کانال رودخانه می‌توان مقدار CN، میزان نفوذ ناپذیر و زمان تاخیر حوضه را تعیین کرد. (یان و همکاران، ۲۰۱۵). کاربری زمین در سال ۱۹۸۶ در مدل برای شبیه‌سازی سیل در سال 1983Dec12 گنجانده شد و کاربری زمین از سال 2006 برای شبیه‌سازی سیل رخ داده در سال 2001Aug11 استفاده شد و کاربری زمین

سال ۲۰۲۰ برای سیل 2019May21 مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای اصلی که باید کالیبره شوند، شماره منحنی SCS، Lag Time زمان تاخیر، ثابت ذخیره K و وزن مخصوص تخلیه X هستند. برای کالیبره کردن پارامترهای مدل HEC-HMS از روش جستجوی Nash Sutcliffe استفاده شد. مدل هیدرولوژیکی حوضه رودخانه گرگان رود با استفاده از سه سیل مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. اعتبارسنجی مدل آمار کالیبراسیون و اعتبارسنجی در جدول (۵) نشان داده شده است و هیدروگراف‌های سیل مشاهده شده از آنها در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده است. ضریب نش (Ens) برای سه دوره از سیلاب با مقادیر بالا به ترتیب ۰/۸۲، ۰/۹۹ و ۰/۹۶ بدست آمد که نشان دهنده تطابق بسیار خوب هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی می‌باشد همانطور که در جدول ۶ نشان داده شده است، حجم سیل نسبی و اوج سیلاب نسبی سیل کالیبراسیون و راستی آزمایشی همگی در ۲۰٪ هستند. مطابق شکل ۸ و ۹، هیدروگراف سیل شبیه سازی شده توسط بخش خروجی حوضه رودخانه گرگان رود با سیلاب‌های کالیبراسیون و راستی آزمایشی با جریان اندازه گیری شده مطابقت دارد. بنابراین، این مدل برای شبیه‌سازی پاسخ‌های هیدرولوژیکی به تغییرات کاربری زمین تعیین شده دارای اعتبارسنجی بالایی می‌باشد. از آنجایی که هدف این مطالعه ارزیابی تأثیر تغییر کاربری زمین در تغییرات هیدروگراف سیل می‌باشد، یک بار مدل با داده‌های پیش‌بینی شده با احتساب تغییر اقلیم ارزیابی و بار دیگر با میزان بارش ثابت دوره‌های تاریخی در سناریوهای مختلف کاربری اراضی ران و نتایج مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت از جدول (۶) می‌توان مشاهده کرد که رویدادهای سیل با اندازه‌های مختلف منجر به درجات مختلف افزایش با استفاده پیش‌بینی شده در سال ۲۰۴۰ شده است. به نظر می‌رسد که سیل با فرض ثابت بودن مقادیر بارش نسبت به تغییر کاربری اراضی حساس‌تر است. پیک سیل و حجم سیلاب در سال ۲۰۴۰ به ترتیب ۵۱٪/۱۱ و ۵۳٪/۸۸ تسیت به سال ۲۰۲۰ افزایش داشته است، در حالی که این مقادیر برای سیلاب با قرض تغییر اقلیم ۹/۹۶٪ و ۶/۹۷٪ کاهش یافت. شکل (۱۲ و ۱۰) فعل و انفعالات پوشش گیاهی با خاک و آب‌های سطحی می‌تواند چرخه هیدرولوژیکی محلی را تغییر دهد (یه و همکاران، ۲۰۱۱). تبدیل پوشش‌های گیاهی به سطوح مهر و موم شده، مانند ساختمان‌ها و جاده‌ها نیز پیامدهای هیدرولوژیکی قابل توجهی دارد (پولمنس و همکاران، ۲۰۱۰). در میان گروه‌های کاربری اراضی در نظر گرفته شده در این مطالعه، زمین شهری دارای بالاترین ارزش CN بوده و پس از آن زمین‌های خشک، شالیزارها و زمین‌های جنگلی قرار دارند. نوع کاربری زمین با مقدار CN کمتر، با ظرفیت نفوذ بالاتر مطابقت دارد (نیل و همکاران، ۲۰۱۶). بنابراین، هر چه مقدار CN بیشتر باشد، استفاده از زمین منجر به افزایش نفوذناپذیری سطح زیرین می‌شود و از این رو، بازده رواناب حوضه را افزایش می‌دهد.



شکل ۸. اعتبارسنجی مدل HEC-HMS برای سیلاب‌های منتخب، خروجی حوضه گرگان رود به ترتیب از چپ به راست:

سیلاب سال ۲۰۰۱-۱۹۸۳



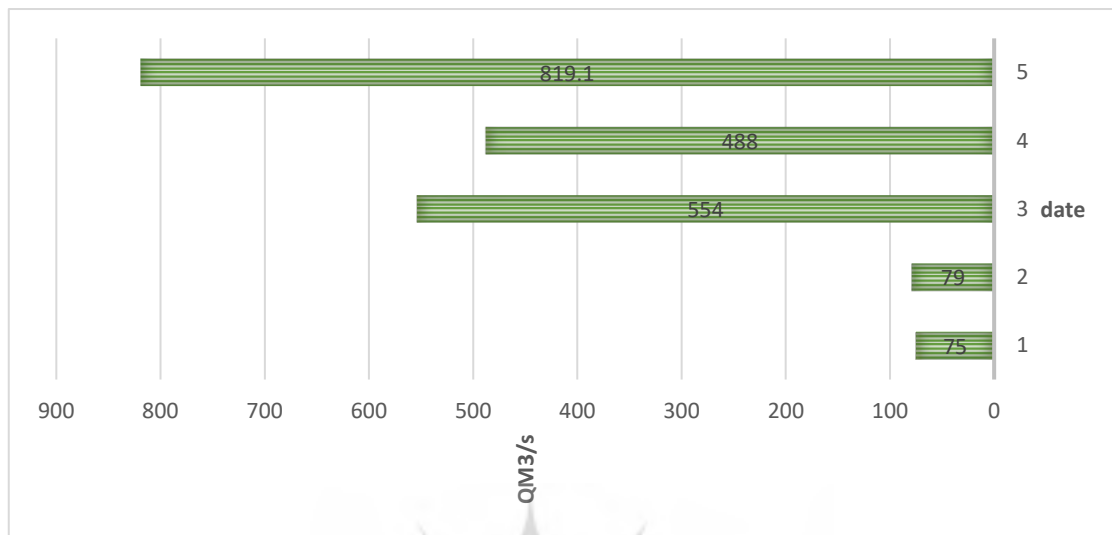
شکل ۹. اعتبار سنجی مدل HEC-HMS برای سیلاب‌های منتخب، خروجی حوضه گرگان رود: سیلاب سال ۲۰۱۹

جدول ۵. خلاصه ای از عملکرد مدل، در سه سیل شبیه سازی شده و کالیبره شده با مدل HEC-HMS

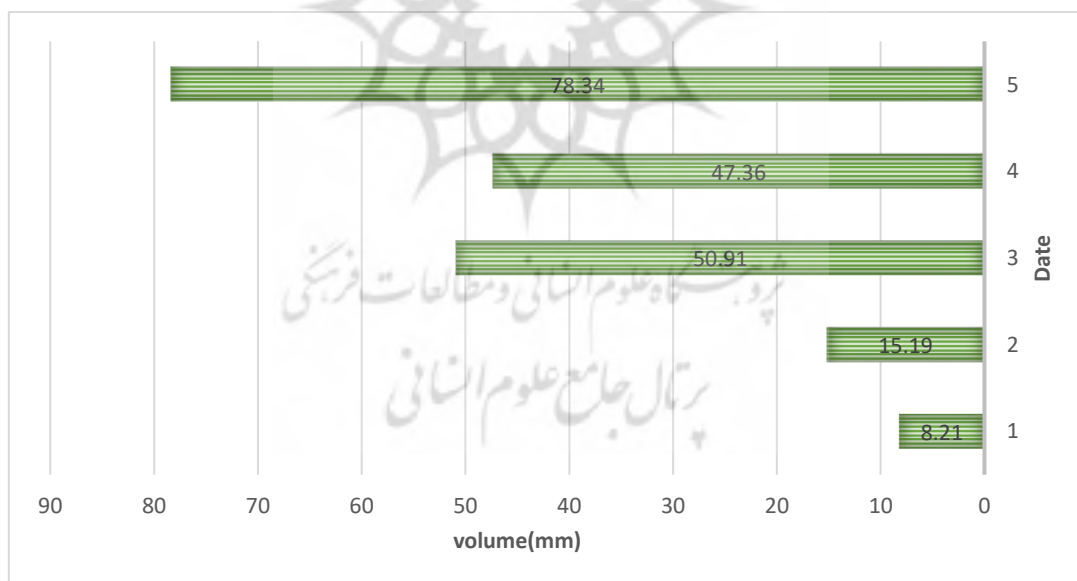
تاریخ وقوع رخداد	دبی اوج (M3/S)		درصد خطا	حجم سیلاب (MM)		درصد خطا	ضریب Nash Sutcliffe	T Lag (hr)	CN
	دبی اوج مشاهده‌ای (M3/S)	دبی اوج محاسباتی (M3/S)		حجم مشاهده‌ای	حجم محاسباتی				
1983Dec12	۸۹	۷۵	-۱۵/۱۵	۹/۶۸	۸/۲۱	۱/۸	۰/۹۶	۷۷۶	۷۹
2001AUg11	۸۲	۷۹	-۱۶/۴۲	۱۸/۱۷	۱۵/۱۶	۲/۶۲	۰/۸۲	۷۷۷	۸۰
2019May21	۶۱۳	۵۴۲	-۱/۴۶	۵۱/۶۱	۵۰/۹۱	۱/۹	۰/۹۹	۷۷۸	۸۱

جدول ۶. مقایسه حجم و دبی اوج سیلاب سال ۲۰۴۰ با فرض ثابت بارش و تغییر اقلیم در سناریو شبیه سازی شده کاربری اراضی سال ۲۰۴۰ با سالهای ماقبل برای خروجی حوضه گرگان رود (W21) با استفاده از مدل HEC-HMS

Date	دبی اوج (M3/S)	درصد تغییرات (%)	حجم سیلاب (MM)	درصد تغییرات (%)	T Lag (hr)	CN
1983December12	۷۵	۵/۳۳	۸/۲۱	۸۴/۶۵	۷۷۶	۷۹
2001August11	۷۹		۱۵/۱۶		۷۷۷	۸۰
2019May21	۵۴۲	۵۸۶/۰۱	۵۰/۹۱	۷۰/۴۱	۷۷۸	۸۱
2040 (فرض ثابت بارش)	۸۱۹	۵۱/۱۱	۷۸/۳۴	۲۳۵/۸۲	۷۷۵	۸۳
2040 (سناریو تعبیر اقلیم)	۴۸۸	-۹/۹۶	۴۷/۳۶	-۵/۷۲	۷۷۵	۸۳



شکل ۱۰. میزان دبی سیلاب شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل HEC-HMS برای سالهای ۱۹۸۳-۲۰۰۱-۲۰۱۹-۲۰۴۰



شکل ۱۱. میزان حجم سیلاب شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل HEC-HMS برای سالهای ۱۹۸۳-۲۰۰۱-۲۰۱۹-۲۰۴۰

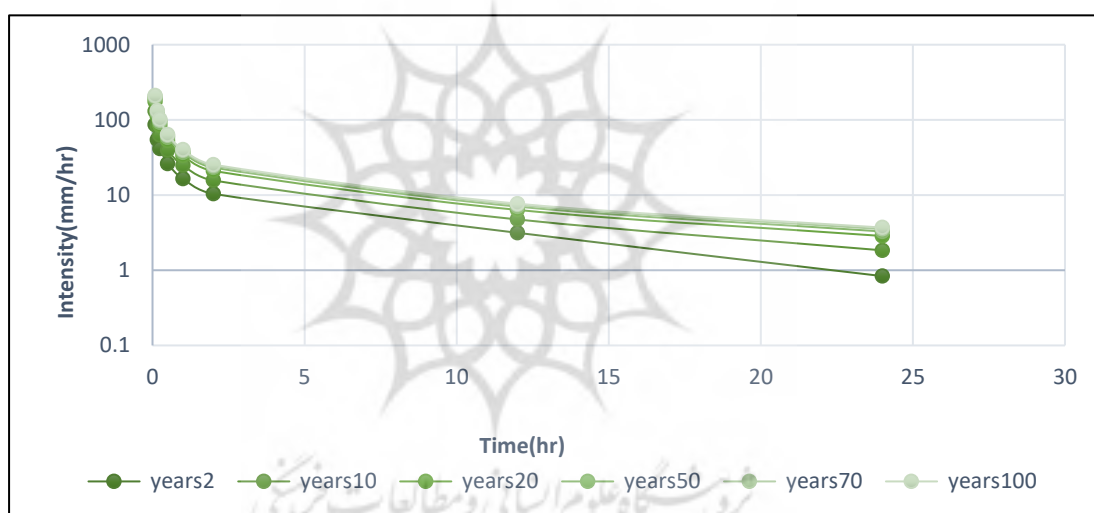
پاسخ‌های هیدرولوژیکی به تغییرات کاربری اراضی

تغییرات کاربری اراضی بر فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه گرانرود اثرگذار بوده است، طبق ارزیابی‌های انجام شده بر روی سیلاب‌های گذشته (سال ۱۹۸۳، ۲۰۰۱، ۲۰۱۹) با کاربری‌های سال ۱۹۸۶، ۲۰۰۶، و ۲۰۲۰، کالیبراسیون و اعتبار سنجی برای هر سه دوره انجام شد شکل (۸،۹) همانطور که نتایج نشان می‌دهد میزان تغییرات کاربری اراضی در دبی اوج

و حجم سیلاب اثر گذار بوده است و میزان نرخ رشد دبی اوج برای سیلاب سال ۲۰۲۰ نسبت به سیلاب سال ۱۹۸۳، ۸۵/۴۸٪ بوده است. میزان مساحت کاربری اراضی جنگلی مورد نظر در سالهای ۱۹۸۶، ۲۰۰۶، ۲۰۲۰، ۲۰۴۰، در حوضه گرگان رود به ترتیب ۳۳۴۲/۸۰، ۲۵۳۰/۳۰، ۱۸۱۹/۸۷ و ۱۵۶۷ کیلومتر مربع می‌باشد، که نشان دهنده روند کاهشی میزان اراضی جنگلی به میزان ۵۳ درصد نسبت به سال ۱۹۸۶ در منطقه مورد نظر می‌باشد. از آنجایی که حوضه مورد نظر در سال‌های اخیر با سیلاب‌های متعددی روبرو بوده است، می‌توان یکی از علل مهم آن را کاهش این اراضی در نظر گرفت. پوشش گیاهی بیشترین سهم را در افزایش رواناب و رسوب در منطقه ایفا می‌کند. دومین کاربری مربوط به مناطق شهری می‌باشد، مساحت بدست آمده به ترتیب سالهای نامبرده؛ ۳۳۱/۷۰، ۴۷۸/۱۷، ۶۳۰/۳۰ و ۶۳۴ کیلومتر مربع می‌باشد که نشانگر روند افزایشی در بازه زمانی ۵۵ ساله به میزان ۹۱ درصد در منطقه مورد نظر می‌باشد. اوج و حجم سیل با افزایش نسبت کاربری زمین شهری افزایش می‌یابد. تبدیل اساسی مزارع شالیزار، زمین‌های جنگلی و زمین‌های خشک به زمین شهری منجر به افزایش رواناب سطحی و تسریع تلاقی می‌شود (یوگنگوو همکاران، ۲۰۲۰). کاربری سوم اراضی کشاورزی می‌باشد که میزان آن بر اساس سال‌های مورد بررسی، ۳۷۴۱/۴۰، ۴۰۹۷/۶۹، ۴۷۴۲/۵۱، ۴۹۹۲ کیلومتر مربع می‌باشد که در سال ۲۰۰۶ کمی افزایش و در سال ۲۰۲۰ روند افزایشی آن را به میزان ۲۶/۷۶ درصد نشان می‌دهد و در سال ۲۰۴۰ به میزان ۵/۲۲٪ افزایش داشته است. کاربری چهارم مربوط به سطوح آبی در منطقه مورد نظر می‌باشد، میزان آن نشان دهنده افزایش جزئی آن در سال ۲۰۲۰ است. کاربری پنجم مراتع با پوشش خوب در منطقه می‌باشد که میزان آن در سالهای نامبرده به ترتیب ۲۷۶۹/۱۱، ۲۸۳۲/۱۱، ۲۹۱۱/۶۷، ۳۰۱۰ کیلومتر مربع می‌باشد که نشانگر روند افزایشی آن است. تغییرات کاربری اراضی در سالهای ارزیابی شده علاوه بر افزایش دبی اوج در دوره‌های نامبرده باعث افزایش حجم سیلاب نیز شده است و میزان افزایش حجم در سال ۲۰۲۰ نسبت به سیلاب سال ۱۹۸۳، ۵۳/۸۸ درصد افزایش داشته است. آنچه که از داده‌های پیش بینی بارش آینده مشخص است درصد کاهش بارندگی در منطقه می‌باشد. به همین دلیل کاهشی به میزان ۹۶/۹٪ در اوج و ۶/۹۷٪ در حجم سیلاب پیش بینی شده در سال ۲۰۴۰ ایجاد شده است. از آنجایی که هدف اصلی این پژوهش میزان اثر تغییرات کاربری اراضی در اوج و حجم سیل است علاوه با داده‌های بارشی پیش بینی شده در مدل HEC-HMS، با داده‌های بارشی ثابت (بارش‌های سال ۲۰۲۰) نیز مدل مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آن روند افزایشی را نشان داد به ترتیب ۵۱/۱۱٪ و ۵۳/۸۸٪ باعث افزایش در اوج و حجم سیلاب شده است. آنچه که مشخص است در ایجاد سیلاب در یک منطقه فاکتور اصلی بارش می‌باشد اما عوامل مورفولوژی منطقه نیز در تشدید آن نقش مهمی را ایفا می‌کند همانطور که از نتایج مشخص است تغییر کاربری در تشدید سیلاب بسیار موثر است و در این زمینه باید تمهیدات لازم اجرا شود تا از میزان خسارت سیلاب‌های در حوضه گرگان رود کاسته شود. با توجه به آمار مشاهداتی دبی و حجم سیلاب سال ۹۸ و دبی و حجم برآورد شده از مدل HEC-HMC برای خروجی حوضه گرگان رود (شهرستان آق قلا) و تطابق این دو با هم مشخص شد حجم مذکور (۴۱۰ میلیون متر مکعب) که این حجم بیش از ۲/۵ برابر ظرفیت تمامی مخازن و سدهای مسیر گرگان رود برآورد شده است. وجود سد بوستان، گلستان و وشمگیر عامل مهمی در کاهش سیلابهای هستند، لیکن در بارش‌های سال ۱۳۹۸ که هم از لحاظ مدت و شدت طولانی بوده است این سدها اثر قابل ملاحظه‌ای نداشته و باعث سیل‌گیری در پایین دست حوضه گرگان رود شده است. میزان ظرفیت عبوری دبی در خروجی گرگان رود ۲۰۰ متر مکعب بر ثانیه برآورد شده است در حالی که این میزان در سیلاب‌های منتخب از جمله سال ۱۳۹۸، ۵۴۲ متر مکعب برآورد گردید است که نسبت به میزان مشاهداتی (۶۱۳ متر مکعب بر ثانیه) آن اختلاف کمی دارد. با این حال رودخانه گرگان رود در

پایین دست قادر به عبور این مقدار نخواهد بود و باعث خسارات فراوان در محدوده شهرستان اق قلا و اطراف می شود. و برای این امر باید راهکارهای مدیریتی مناسب با منطقه را در نظر گرفت.

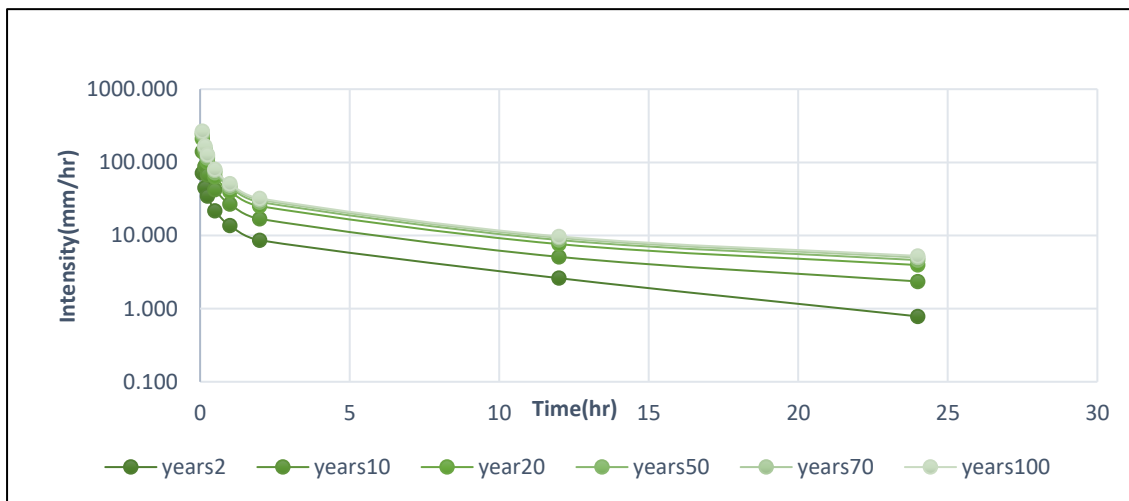
Duration (min)	5	10	15	30	60	120	720	1440
Return Period (year)								
2	86.430	54.448	41.551	26.176	16.490	10.388	3.146	0.836
10	130.202	82.022	62.595	39.432	24.841	15.649	4.739	1.839
20	174.435	109.887	83.860	52.828	33.280	20.965	6.349	2.854
50	192.895	121.516	92.734	58.419	36.802	23.184	7.021	3.277
70	203.625	128.276	97.893	61.668	38.849	24.473	7.412	3.523
100	211.219	133.060	101.543	63.968	40.298	25.386	7.688	3.697



جدول ۷. حداکثر شدت بارش در تداوم های کوتاه مدت برای دوره های بازگشت مختلف (۱۹۸۰-۱۹۹۹)

شکل ۱۲. دسته منحنی های IDF برای سالهای (۱۹۸۰-۱۹۹۹)

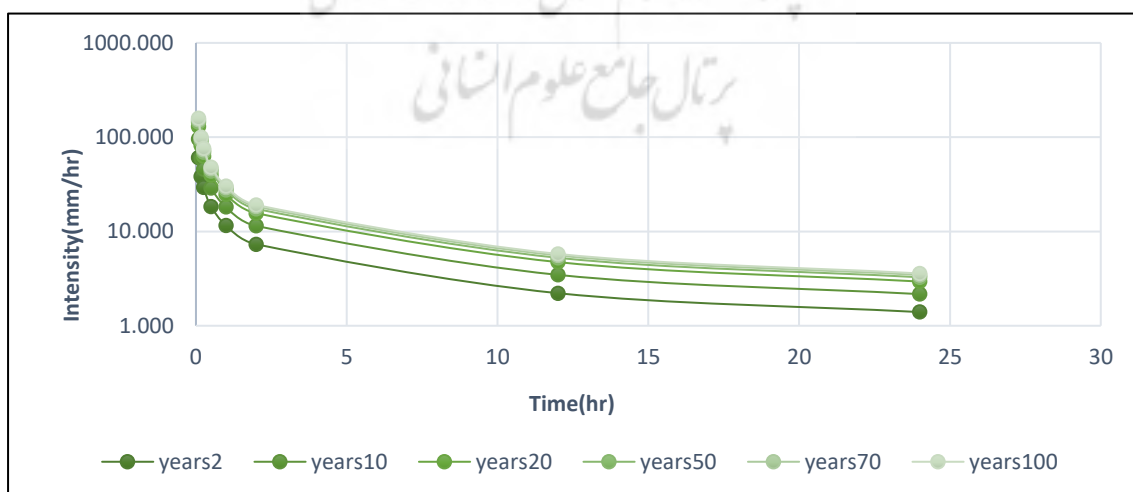
جدول ۸. حداکثر شدت بارش در تداوم های کوتاه مدت برای دوره های بازگشت مختلف (۲۰۰۰-۲۰۲۰)



شکل ۱۳. دسته منحنی های IDF برای سالهای دوره اخیر (۲۰۲۰-۲۰۰۰)

Duration (min)	5	10	15	30	60	120	720	1440
Return Period (year)								
2	71.597	45.103	34.420	21.683	13.660	8.605	2.606	0.783
10	140.1036	88.260	67.355	42.431	26.730	16.839	5.100	2.354
20	209.331	131.870	100.636	63.397	39.937	25.159	7.619	3.941
50	238.223	160.650	122.599	77.232	48.653	30.650	9.282	4.989
70	255.016	128.276	97.893	61.668	38.849	24.473	7.412	3.523
100	266.901	168.137	128.313	80.832	50.921	32.078	9.715	5.261

جدول ۹. حداکثر شدت بارش در تداوم های کوتاه مدت برای دوره های بازگشت مختلف (۲۰۴۰-۲۰۲۱)



70	152.963	96.360	73.537	46.325	29.183	18.384	5.568	3.456
100	158.931	100.120	76.406	48.133	30.322	19.101	5.785	3.589

شکل ۱۴. دسته منحنی های IDF برای سالهای دوره اخیر (۲۰۲۱-۲۰۴۰)

تحلیل دوره‌های بازگشت سیلاب برای سه سناریو بارش

بیشتر سازه‌های هیدرولوژیکی با استفاده از شدت بارش‌های طراحی با دوره بازگشت و زمان تداوم مشخص طراحی می‌شوند. لذا منحنی‌های شدت-مدت فراوانی (IDF) نقش اساسی در طراحی ابعاد و اجزای این سیستم‌ها دارند. این منحنی‌ها با استفاده از داده‌های مربوط به بارش‌های تاریخی ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی استخراج می‌شود. و از طرف دیگر با توجه به پدیده تغییر اقلیم که پیامد رشد روز افزون فعالیت‌های انسان است، الگوی بارش در مناطق مختلف جهان تغییر کرده است و لذا نیاز به اصلاح منحنی‌های شدت مدت فراوانی (IDF) در شرایط جدید، و پیش‌بینی برای آینده می‌باشد. مقادیر بارش محاسبه شده در دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ ساله با استفاده از داده‌های جدول (۷، ۸، ۹)، دسته‌های منحنی‌های IDF برای دوره‌های مختلف ترسیم شده را نشان می‌دهد. با توجه به پدیده تغییر اقلیم که در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ اهنک تاثیر بیشتری بر پدیده‌های هیدرولوژیکی داشته است، باعث شده تغییرات زیادی بر شدت بارندگی‌های کوتاه مدت بگذارد و بطور میانگین منحنی‌های IDF تا پایان سال ۲۰۲۱ به اندازه ۲۰ درصد به سمت بالا جابجا (افزایش شدت) و پس از آن این افزایش شدت، کاهش داشته اما با اهنک کمتری حدود ۳۳ درصد نسبت به دوره دوم و ۴۰ درصد نسبت به دوره اول. لذا با توجه به کاهش بارندگی در دوره سوم ۲۰۲۱-۲۰۴۰ میانگین بارش‌ها در این منطقه کاهش خواهد داشت اما شدت بارندگی کوتاه مدت با افزایش همراه خواهد بود. و به همین علت نتایج نشان دهنده کاهش اوج و حجم سیلاب‌های در سال ۲۰۴۰ نسبت به سال ۲۰۲۰ بوده است ولی با توجه به شدت بارش‌ها دبی و حجم سیلاب برای خروجی حوضه آبریز گرگان رود مخرب خواهد بود. با فرض ثابت بودن بارندگی تاثیر تغییرات کاربری اراضی طبق نتایج برآورد شده کاملاً مشهود می‌باشد. با توجه به بررسی آمار سه دوره بارشی دوره‌های بازگشت برای سه دوره مورد نظر تهیه و میزان دبی و حجم آن با هم مقایسه شده است. جدول (۱۰، ۱۱) همانطور که مشخص است میزان اوج رواناب در دوره بازگشت ۲ ساله برای دوره اول ۱۰۶/۰۵ متر مکعب بر ثانیه بوده است و در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله همان دوره به ۶۸۵/۰۴ متر مکعب بر ثانیه رسیده است (۸۴٪ افزایش). برای دوره دوم این مقدار به ۹۱/۷۱٪ درصد افزایش برای دوره بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال رسیده است. و برای دوره سوم با مقدار ۷۰/۶۵٪ درصد افزایش در دوره‌های بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال همان دوره و ۳/۷۵٪ افزایش نسبت به دوره اول و ۳۵/۱۵٪ کاهش نسبت به دوره دوم رسیده است که علت اصلی این کاهش تغییرات در میزان بارندگی برای دوره سوم است. که با وجود کاهش بارندگی، تغییرات کاربری اراضی باعث افزایش میزان دبی و حجم نسبت به دوره اول شده است. میزان تغییرات دبی اوج هیدروگراف سیل در شکل (۱۷) در دوره بازگشت‌های مختلف (برای هر سناریو) در حوضه گرگان رود نشان داده شده است. مقادیر دبی در دوره بازگشت‌های ۲ سال کمتر از ۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه و در دوره بازگشت‌های ۱۰۰ سال بیشتر از ۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه است. با توجه به نتایج می‌توان گفت سیلاب‌ها با دوره بازگشت ۲ سال به علت داشتن ظرفیت عبوری خروجی رودخانه گرگان رود تهدیدی بر این ناحیه نمی‌باشد ولی سیلاب‌ها با دوره بازگشت ۱۰ به بالا برای این منطقه خطر آفرین هستند.

جدول ۱۰. مقادیر بارش در دوره بازگشتهای مختلف، خروجی حوضه گرگان رود (w21) برای سه سناریو بارشی با دوره ۲۰ ساله

دوره بازگشت	بارش (میلی متر)		
	تاریخی (۱۹۸۰-۱۹۹۹)	دوره اخیر (۲۰۲۰-۲۰۰۰)	دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰)
۲	۲۰/۰۵	۱۸/۷۹	۲۰/۸۴
۱۰	۴۴/۱۴	۵۶/۴۹	۳۶/۸۹
۲۰	۶۸/۴۸	۹۴/۵۸	۵۳/۱۲
۵۰	۷۸/۶۴	۱۱۰/۴۹	۵۹/۹۰
۷۰	۸۴/۵۴	۱۱۹/۷۳	۶۳/۸۴
۱۰۰	۸۷/۷۲	۱۲۶/۷۲	۶۶/۶۳

جدول ۱۱. مقادیر اوج دبی، حجم رواناب در دوره بازگشتهای مختلف، خروجی حوضه گرگان رود (w21) برای سه سناریو بارشی با دوره ۲۰ ساله

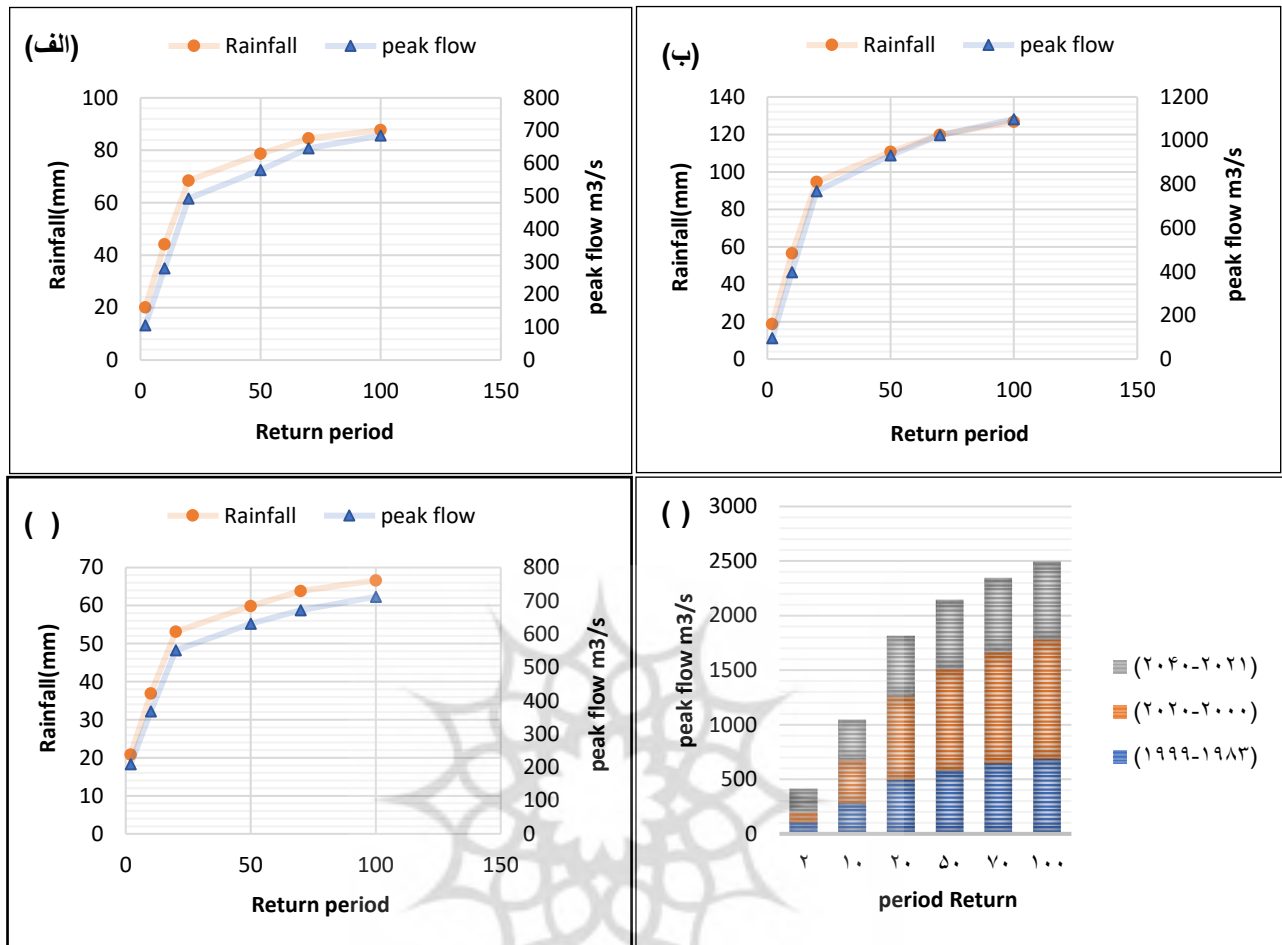
دوره بازگشت	دبی اوج (M3/S)			حجم سیلاب (MM)		
	تاریخی (۱۹۸۰-۱۹۹۹)	دوره اخیر (۲۰۲۰-۲۰۰۰)	دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰)	تاریخی (۱۹۸۰-۱۹۹۹)	دوره اخیر (۲۰۲۰-۲۰۰۰)	دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰)
۲	۱۰۶/۰۵	۹۶/۰۲	۲۰۹/۳	۱۰/۳۸	۳۷/۹	۲۰/۲۹
۱۰	۲۸۰/۰۴	۳۹۸/۰۸	۳۶۸/۱	۲۷/۱۷	۳۸/۱۰	۳۵/۰۲
۲۰	۴۹۳/۰۱	۷۶۸/۹	۵۵۱/۴	۴۶/۸۷	۷۶/۷۱	۵۱/۷۴
۵۰	۵۸۰/۰۱	۹۳۲/۳	۶۳۱/۳	۵۵/۵۵	۸۶/۶۰	۵۹/۰۱
۷۰	۶۴۶/۰۶	۱۰۲۵	۶۷۱/۶	۶۰/۸۶	۹۵/۰۵	۶۲/۶۷
۱۰۰	۶۸۵/۰۴	۱۰۹۸	۷۱۲/۲	۶۳/۴۳	۱۰۱/۶۶	۶۶/۳۶

جدول ۱۲. میزان تغییرات دبی به ازای تغییر در دوره بازگشتهای مختلف خروجی حوضه گرگان رود (w21) برای سه سناریو بارشی با دوره ۲۰ ساله

دوره بازگشت	میزان تغییرات دبی اوج (M3/S)			درصد تغییرات (MM)		
	تاریخی (۱۹۸۰-۱۹۹۹)	دوره اخیر (۲۰۲۰-۲۰۰۰)	دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰)	تاریخی (۱۹۸۰-۱۹۹۹)	دوره اخیر (۲۰۲۰-۲۰۰۰)	دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰)
۲-۱۰	۱۷۳,۹۹	۳۳۹,۶	۱۵۸,۸	۱۶۴,۶	۳۱۴,۵۸	۷۵,۸۵
۱۰-۲۰	۲۱۲,۹۷	۳۷۰	۱۸۳,۳	۷۶,۰۶	۹۳,۱۵	۴۹,۸۰
۲۰-۵۰	۸۷	۱۶۳,۴	۷۹,۹	۱۷,۶۵	۲۱,۲۵	۱۴,۴۹
۵۰-۷۰	۶۶,۰۳	۹۷,۷	۴۰	۱۱,۳۹	۹,۹۴	۶,۳۸
۷۰-۱۰۰	۳۸,۹۸	۷۳	۴۰,۸	۶,۰۶	۷,۱۲	۶,۰۵

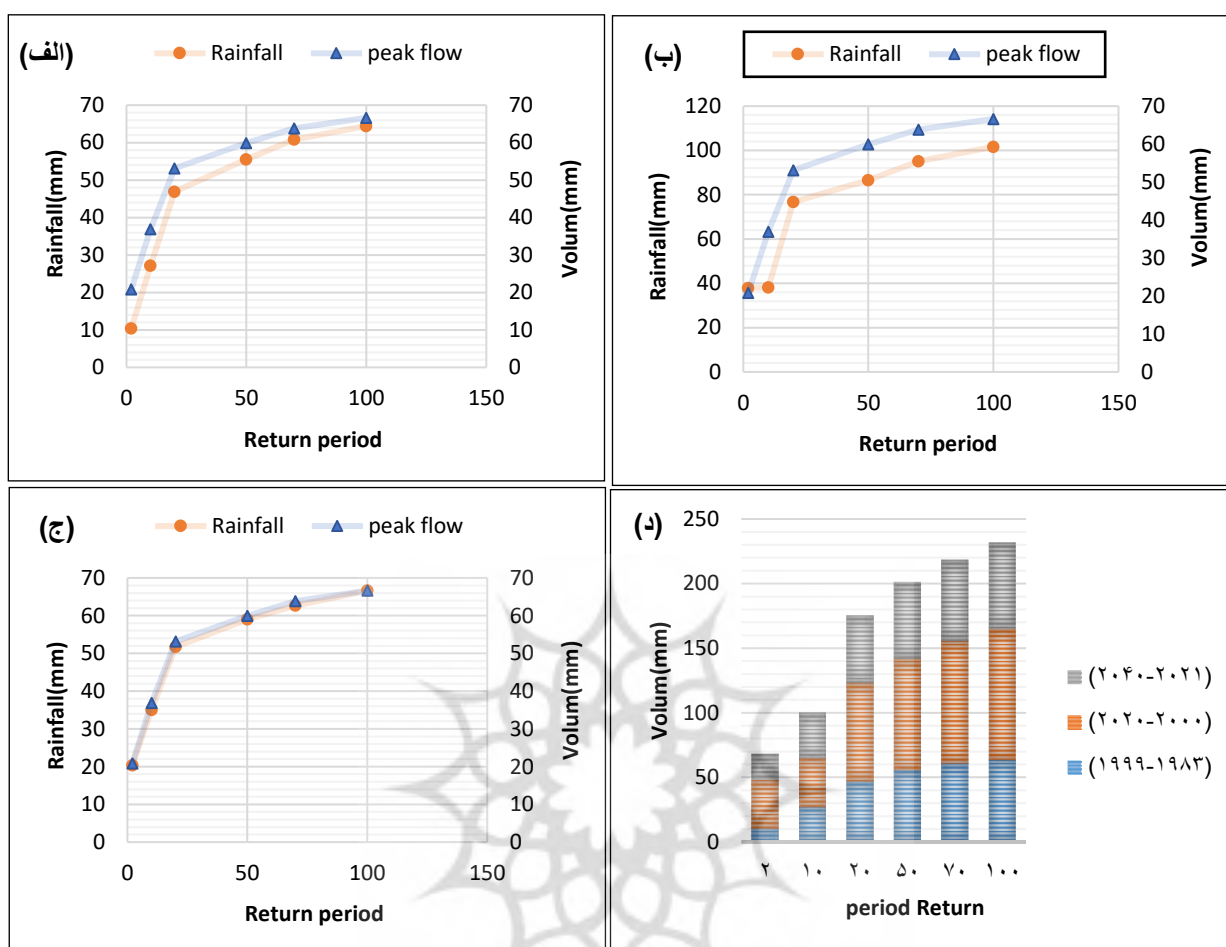
ساله

همان طور که از جدول (۱۲) مشخص است، به دلیل تغییرات کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه به ویژه تبدیل اراضی جنگلی به کشاورزی و مسکونی باعث افزایش سطوح نفوذ ناپذیر در حوضه شده است و این تغییرات موجب افزایش CN و رواناب بیشتر شده است. همانطور که از دبی خروجی حوضه گرگان رود مشخص است میزان دبی و حجم برای دوره های بازگشت ۵ تا ۱۰۰ سال در هر سه دوره روند افزایشی داشته و این مقدار برای دوره دوم به بیشترین میزان یعنی حدود ۱۰۹۷ متر مکعب برای دوره ۱۰۰ ساله رسیده است. که حدود چند برابر ظرفیت عبوری رودخانه گرگان رود می باشد.



شکل ۱۵. تغییرات دبی اوج سیل به ازای دوره بازگشت‌های مختلف بارش برای دوره‌های مختلف الف: (۱۹۸۳-۱۹۹۹)؛ ب: (۲۰۰۰-۲۰۲۰)؛ ج: (۲۰۲۰-۲۰۴۰)؛ د: مقادیر دبی اوج به ازای دوره بازگشت‌های مختلف بارش در حوضه گرکان رود

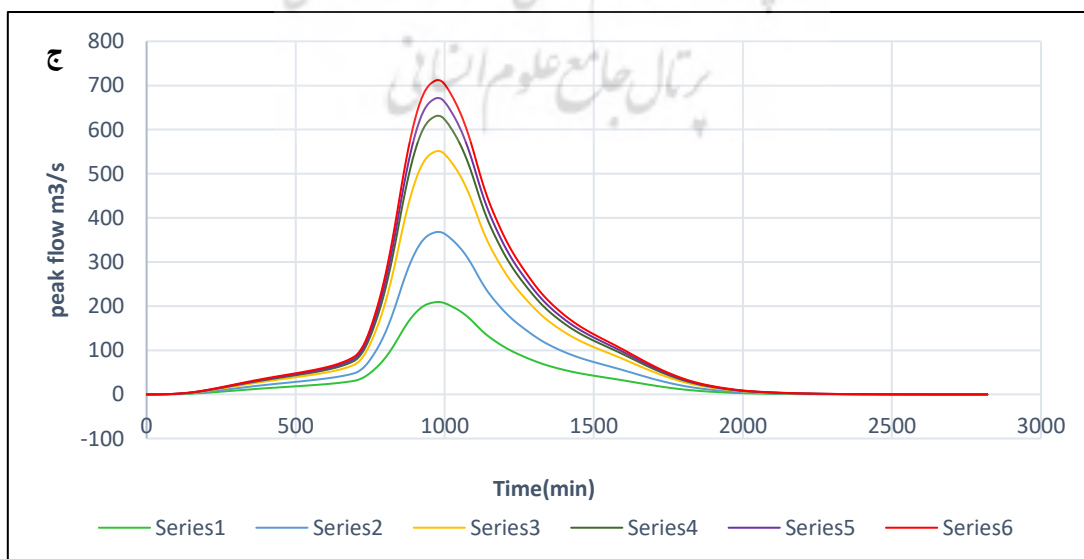
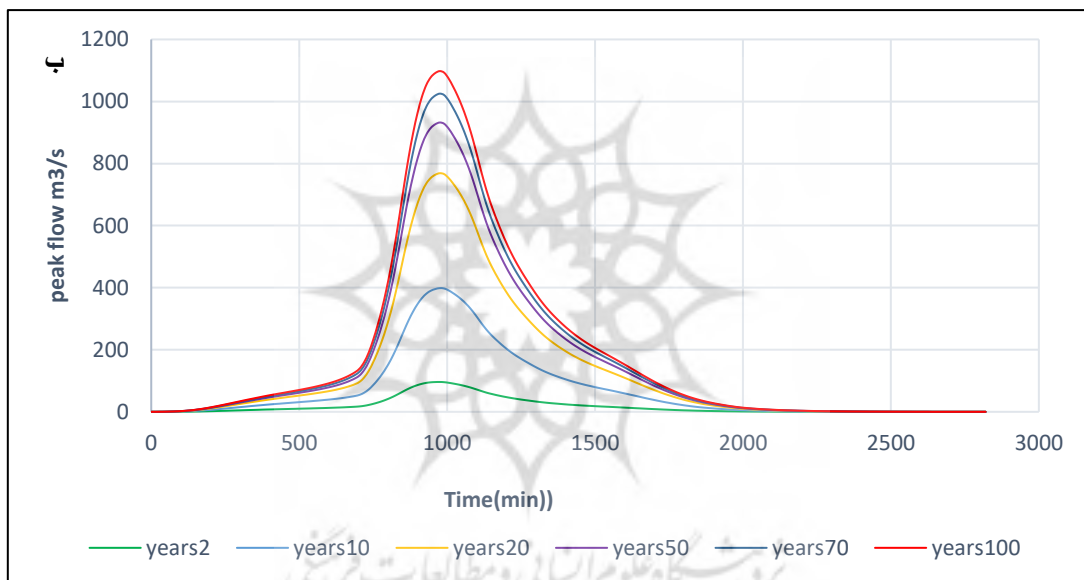
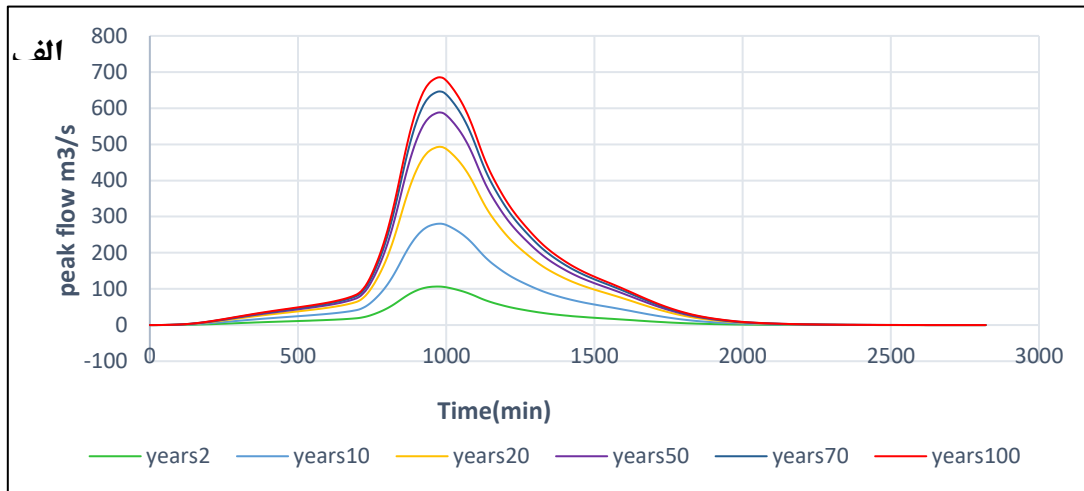
میزان تغییرات دبی در جدول (۱۲) آورده شده است که افزایش دبی از دوره بازگشت ۲ ساله به ۱۰ ساله در دوره اول. مترمکعب در ثانیه می‌باشد که افزایش ۱۶۴٫۶ درصدی داشته است و برای دوره دوم و سوم به ترتیب به میزان ۳۱۴٫۵۸ و ۷۵٫۸۵ درصد افزایش پیدا کرده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش بارش از دوره بازگشت ۷۰ به ۱۰۰ ساله، مقدار افزایش دبی برای دوره اول برابر ۶٫۰۶ درصد و دوره دوم و سوم ۷٫۱۲ و ۶٫۰۵ بوده است. میزان دبی اوج سیل و حجم سیلاب به ازای افزایش دوره بازگشت بارش در شکل (۱۵) (۱۶) نشان داده شده است. براساس اطلاعات ارائه شده در شکل ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ نکته حایز اهمیت در این تحقیق این است که درصد تغییرات افزایش میزان دبی با افزایش دوره بازگشت بارش، در دوره بازگشت‌های کم‌تر بیش‌تر خواهد بود.



شکل ۱۶. تغییرات حجم سیل به ازای دوره بازگشت‌های مختلف بارش برای دوره‌های مختلف الف: (۱۹۸۳-۱۹۹۹)؛ ب: (۲۰۰۰-۲۰۲۰)؛ ج: (۲۰۲۰-۲۰۲۱)؛ د: مقادیر حجم به ازای دوره بازگشت‌های مختلف بارش در حوضه گرگان رود

بحث و جمع بندی پژوهش

حوضه آبریز گرگان رود شاهد سیل‌ها متعددی بوده است، از جمله سیلاب سال ۱۳۹۸ که باعث سیلگیری خسارت باری در خروجی حوضه گرگان رود شده است. هدف اصلی در این پژوهش تعیین اثر تغییرات کاربری اراضی بر مولفه‌های هیدرولوژیکی و پیش‌بینی میزان واکنش‌های هیدرولوژیکی به این تغییرات در آینده می‌باشد. شکل (۷) و تغییرات آن در مدل HEC-HMS آورده شد. داده‌های هواشناسی شامل بارش روزانه و دما حوضه رودخانه گرگان رود از سال ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۰ از شرکت آب منطقه‌ای گلستان تهیه شد و در دوره اخیر و آینده منحنی‌های IDF بر اساس تغییر اقلیم برای آن برآورد شده است. داده‌های بارندگی بارش روزانه ۹ ایستگاه از جمله دو سد گلستان و وشمگیر در حوضه و در مدل HEC-HMS مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های هیدرولوژیکی رواناب روزانه از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۰ در ایستگاه آق قلا در مرحله کالیبراسیون در رودخانه گرگان رود مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (۸) (۹) استخراج بارندگی‌های متناظر با سیلاب‌های ثبت شده در تاریخ‌های ۱۲/۱۲/۱۹۸۳، ۱۱/۸/۲۰۰۱، ۲۱/۳/۲۰۱۹، و تهیه‌آب‌نمود سیل ایستگاه‌های آب‌سنجی، مرحله بعدی کار پژوهش بود.



شکل ۱۷. اوج جریان تخمینی برای رویدادهای ۲ تا ۱۰۰ ساله خروجی حوضه گرگان رود: برای دوره های اقبلمی (الف) تاریخی (۱۹۸۰-۱۹۹۹). (ب) دوره اخیر (۲۰۰۰-۲۰۲۰). (ج) دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰). با اثر کاربری اراضی سالهای (۲۰۲۰، ۲۰۰۶، ۱۹۸۶)

سپس مقادیر دبی موجود در سیلاب‌های ثبت شده ایستگاه‌های آب سنجی، برای هر واقعه بارندگی استخراج و سپس بارندگی روزانه متناظر با آن واقعه استخراج گردید که پس از بررسی آنها سه واقعه بارش و سیل متناظر با آن واقعه با رعایت همزمانی در کلیه ایستگاه‌ها انتخاب گردید. برآوردها همراه سایر پارمترها موثر در تولید رواناب جهت شبیه سازی فرایند بارش-رواناب و تخمین دبی و حجم در خروجی حوضه وارد مدل هیدرواویژیکی HEC-HMS گردید. نتایج حاکی از آن است که تغییرات کاربری اراضی علاوه بر افزایش دبی اوج در سه دوره ۲۰ ساله، باعث افزایش حجم سیلاب نیز شده است و میزان افزایش حجم در سال ۲۰۰۱ نسبت به سیلاب سال ۱۹۸۳، ۴۶ درصد افزایش داشته است و نسبت به سال ۲۰۲۰، ۸۰ درصد بوده است. جهت ارزیابی و پیش بینی دبی اوج و حجم برای سال ۲۰۴۰ از کاربری اراضی استخراج شده از نرم افزار TERRSET2020 با روش مارکوف استفاده شده و در مدل HEC-HMS میزان دبی و حجم با توجه به داده‌های بارش از مدل CAMS-CSM1-0 از مجموعه مدل های CMIP6 گردآوری و در مدل مور استفاده قرار گرفت آنچه که از داد های پیش بینی بارش آینده مشخص با توجه به کاهش ۲۴ درصدی بارندگی در سناریو سوم (۲۰۲۱-۲۰۴۰) نسبت به سناریو اول، دبی اوج در این سناریو برای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله به میزان ۳,۹۶٪، نسبت به سناریو اول افزایش داشته است از آنجایی که هدف این مطالعه ارزیابی تأثیر تغییر کاربری زمین، بر روی دبی و حجم سیلاب می باشد در یک مرحله با توجه به داد های بدست آمده از بارش‌های آینده و منحنی های IDF با اثر تغییر اقلیم مدل ران و در یک مرحله با مقادیر بارش حداکثر با اخص بارش سال (۱۳۹۸) با سناریوهای تغییر کاربری زمین اراضی بدست آمده از مدل مارکوف و نقشه های CN منطقه برای سال ۲۰۴۰ مدل ران و نتایج با هم مورد ارزیابی قرار گرفت. از جدول (۶) می‌توان مشاهده کرد که رویدادهای سیل با اندازه های مختلف منجر به درجات مختلف افزایش با استفاده پیش بینی شده در سال ۲۰۴۰ شده است. با توجه به بررسی آمار سه دوره بارشی جدول (۷، ۸، ۹) دوره‌های بازگشت برای سه دوره مورد نظر تهیه و میزان دبی و حجم آن با هم مقایسه شده است. میزان تغییرات حجم و اوج سیلاب در دوره بازگشت های ۲، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ برای ۳ دوره بارشی در جدول (۱۲) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است میزان اوج رواناب در دوره بازگشت ۲ ساله برای دوره اول ۱۰۶/۰۵ متر مکعب بر ثانیه بوده است و در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله همان دوره به ۶۸۵/۰۴ متر مکعب بر ثانیه رسیده است (۸۴٪ افزایش). برای دوره دوم این مقدار به ۹۱,۷۱٪ درصد افزایش برای دوره بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال رسیده است. و برای دوره سوم با مقدار ۷۰,۶۵٪ درصد افزایش در دوره های بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال همان دوره و ۳,۷۵٪ افزایش نسبت به دوره اول و ۳۵,۱۵٪ کاهش نسبت به دوره دوم رسیده است که علت اصلی این کاهش تغییرات در میزان بارندگی برای دوره سوم است. که با وجود کاهش بارندگی، تغییرات کاربری اراضی باعث افزایش میزان دبی و حجم نسبت به دوره اول شده است.

نتیجه گیری

در سال های اخیر به دلایل اقلیمی وقوع سیل در جهان افزایش یافته که حوضه گرگان رود نیز از این قاعده مستثنی نیست. در سیلابهای اخیر حوضه گرگان رود، عوامل طبیعی همچون زمستان پرآب، منجر به مرطوب شدن خاک، پر شدن کانال‌های ذخیره و بالا آمدن سطح ایسای گشته و در نتیجه ضریب رواناب را افزایش داده است. در خصوص عوامل انسانی نیز می توان عدم رعایت اصول آمایش سرزمین و تخصیص کاربری نامناسب، جنگل زدایی را اشاره کرد. نتایج حاکی از آن است که مجموعه دخالت‌های بشری تاب آوری منطقه مورد نظر را نسبت به تنش‌های آب و هوای بسیار کم و شکننده کرده است. همانطور که از ارزیابی‌های تغییرات کاربری در دوره های ۱۹۸۶، ۲۰۰۶، ۲۰۲۰ و ۲۰۴۰ برآورد شده است روند کاهشی چشمگیر در اراضی جنگلی در حوضه حاصل شده است که این میزان در سال ۲۰۴۰ ۵۳,۱۲٪ کاهش را نسبت به

سال ۱۹۸۶ نشان می‌دهد. و با توجه به تغییرات محسوس در تغییرات کاربری اراضی، بر روی هیدروگراف سیلاب‌های اخیر و آینده حوضه گرگان رود تاثیر گذاشته است و به ۸۵,۴۸٪، ۸۳,۸۷٪ میزان افزایش در دبی و حجم سیلاب را در سال ۲۰۲۰ نسبتاً به سال ۱۹۸۶ داشته ایم. با فرض ثابت بودن بارش به میزان ۵۱,۱۱٪ افزایش در دبی و ۵۳,۸۸٪ در حجم برای سال ۲۰۴۰ محاسبه شده است. نتایج دوره بازگشت ۲ تا ۱۰۰ ساله نیز برای سه دوره بارشی نیز نشان دهنده افزایش میزان دبی و حجم را نشان می‌دهد میزان اوج رواناب در دوره بازگشت ۲ ساله برای دوره اول ۱۰۶/۰۵ متر مکعب بر ثانیه بوده است و در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله همان دوره به ۶۸۵/۰۴ متر مکعب بر ثانیه رسیده است (۸۴٪ افزایش). برای دوره دوم این مقدار به ۹۱,۷۱٪ درصد افزایش برای دوره بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال رسیده است. و برای دوره سوم با مقدار ۷۰,۶۵٪ درصد افزایش در دوره‌های بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال همان دوره و ۳,۷۵٪ افزایش نسبت به دوره اول و ۳۵,۱۵٪ کاهش نسبت به دوره دوم رسیده است که علت اصلی این کاهش تغییرات در میزان بارندگی برای دوره سوم است. که با وجود کاهش بارندگی، تغییرات کاربری اراضی باعث افزایش میزان دبی و حجم نسبت به دوره اول شده است. با توجه به تاثیر چشم‌گیر تغییرات کاربری اراضی در اوج و حجم سیلاب در خروجی حوضه گرگان رود لذا پیش‌تها می‌شود توجه کافی به مدیریت اصولی آبخیزهای بالا دست حوضه شود. اثر پوشش گیاهی در به تاخیر انداختن زمان تجمع و جلوگیری از تشکیل رواناب‌های شدید و ناگهانی با دبی بالا از جمله سیلاب سال ۱۳۹۸ در حوضه موردنظر، امر شناخته شده اس است. قطع درختان و عدم جایگزینی آنها، از بین بردن پوشش گیاهی در زیر حوضه‌ها به ویژه آبراهه‌های مشرف به مراکز جمعیتی، باعث افزایش در CN و قدرت حمل و سرعت سیلاب و اثر تخریبی آن را بشدت بالا برده است. در نتیجه علاوه بر راهکارهای مدیریتی سازه‌ای که می‌توان از میزان خسارت سیلاب کاست، با ایجاد و احیای جنگل‌ها می‌توان چنین رخداد‌های کنترل نمود. نتایج حاصل از اجرای و پیش‌بینی تغییرات کاربری در میزان تاثیر در اوج و حجم سیلاب در حوضه گرگان رود نشان دهنده دقت و کارایی زیاد مدل در بررسی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه مورد مطالعه دارد. این نتایج با پژوهش‌های ایلدرمی و همکاران (۱۳۹۹) یوگین گو (۲۰۲۰)، گ.میندو و همکاران (۲۰۱۶) و لی و همکاران (۲۰۱۰) از لحاظ دقت و روش کار مطابقت دارد. بنابراین، ترکیب مدل CA-Markov و مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای تجزیه و تحلیل پاسخ هیدرولوژیکی به روشی متوالی برای بررسی تأثیر هیدرولوژیکی تغییر کاربری زمین پیش‌بینی شده مناسب است. این مطالعه برای اولین بار از مدل CA-Markov برای پیش‌بینی تغییر کاربری توزیع شده با تجزیه و تحلیل تکامل تاریخی آن از سال ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۱ (یعنی دوره پایه) و پیش‌بینی روند مشاهده شده برای دوره آینده ۲۰۲۱-۲۰۴۰ استفاده شده است.

منابع

- ایلدرمی، ع.، و همکاران (۱۳۹۶)، پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از مدل زنجیره‌های مارکوف و CA مارکوف (مطالعه موردی: حوزه آبخیز گرین)، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز سال هشتم/ شماره ۱۶ / پاییز و زمستان ۱۳۹۶
- احمد آبادی، ع.، و همکاران (۱۳۹۵)، پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات هیدروژئومورفولوژی حوضه آبریز کن بر اساس مدل ریزمقیاس‌نمای آماری، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال هجدهم، شماره ۵۱، زمستان ۹۷
- رحمانی و همکاران (۱۳۹۵). ارزیابی تغییر کاربری اراضی بر ویژگی‌های هیدرولوژیک حوضه آبخیز کسلیان، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، دوره ۷، شماره ۱۳، ۲۳-۳۲
- زهتابیان، غ.، و همکاران (۱۳۹۵)، پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از زنجیره مارکوف به منظور پیش‌بینی آن (بررسی موردی: دشت عباس) مرتع و آبخیزداری مجله منابع طبیعی ایرانی دوره ۶۹ شماره ۳۳ پاییز ۱۳۹۵

- سلمانی و همکاران (۱۳۹۷). ارزیابی پاسخ‌های هیدرولوژیکی حوضه آبخیز تیل آباد گلستان طی دوره‌های اتی تحت تاثیر تغییر کاربری اراضی پیش بینی شده، اکوهیدروژئومورفولوژی، دوره ۵، شماره ۲، ۳۹۹-۴۱۸.
- قنواتی، ع.، و همکاران (۱۳۹۵) بررسی پتانسیل سیلاب حوضه آبریز درکه با استفاده از روش بارن رواناب SCS، نشریه جغرافیای سرزمین، دره ۱۳ شماره ۴۹ سال ۱۳۹۵
- صراف و همکاران (۱۳۹۹)، ارزیابی شرایط آب و هواشناختی حوضه آبریز گرگان رود تحت اثر تغییر اقلیم با استفاده از مدل MIROK-ESM
- یمانی، م.، و همکاران (۱۳۹۴)، پیش بینی سیلاب‌های تاریخی رودخانه کشکان با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۴، صص ۱۱۸-۱۳۳.
- Azizi, A., Malakmohamadi, B.; (2016). *Land use and land cover spatiotemporal dynamic pattern and predicting changes using integrated CA-Markov model.*, *Global J. Environ. Sci. Manage.*, 2(3): 223-234, Summer 2016 DOI: 10.7508/gjesm.2016.03.002.
- Asinya, A. Alam, M.G, B. 2021. *Flood Risk in Rivers: Climate Driven or Morphological Adjustment.* *Earth Systems and Environment*, <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00257>.
- Araya, Y.H.; Cabral, P. *Analysis and modeling of urban land cover change in Setúbal and Sesimbra, Portugal.* *Remote Sens.* 2010, 2, 1549–1563.
- Adhikari, S.; Southworth, J., (2012). *Simulating forest cover changes of Bannerghatta National Park based on a CAMarkov model: A remote sensing approach.* *Remote Sens.*, 4(10): 3215-3243 (29 pages).
- Bell F.C. 1969. *Generalized rainfall duration frequency relationships.* *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 95(1): 311-327.
- Bacani, V.M.; Sakamoto, A.Y.; Quéno, H.; Vannier, C.; Corgne, S. *Markov chains-cellular automata modeling and multicriteria analysis of land cover change in the Lower Nhecolândia subregion of the Brazilian Pantanal wetland.* *J. Appl. Remote Sens.* 2016, 10, 016004
- Brown, D.G.; Pijanowski, B.C.; Duh, J., (2000) . *Modeling the relationships between land use and land cover on private lands in the Upper Midwest, USA.* *J. Environ. Manage.*, 59(4): 247-263 (17 pages).
- Behera, M.D.; Borate, S.N.; Panda, S.N.; Behera, P.R.; Roy, P.S., (2012). *Modelling and analyzing the watershed dynamics using Cellular Automata (CA)–Markov model– A geo-information based approach.* *J. Earth Syst. Sci.*, 121(4): 1011-1024.
- Chen, W., Chi, G., Li, J., 2019. *The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change at the county level in China, 1995–2015.* *Sci. Total Environ.* 669, 459–470. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.139>
- E Ghanavati, A Karam, M Aghaalikhani., 2013, *Flood risk zonation in the farahzad basin (Tehran) using Fuzzy model*, *Geography and Environmental Planning* 23 (4), 121-138.
- E Ghanavati, A Safari, E Javid, E Mansorian., 2014, *Natural Geography Research* 25, 67-80.
- E Ghanavati., 2014, *Flood Risk Zonation for Karaj City Using Fuzzy Logic*, *Geography and environmental hazards* 8, 113-131.
- Elhassnaoui, I. (2016). *Generation of Synthetic Design Storm Hyetograph and Hydrologic Modeling under HEC HMS for Ziz Watershed*, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)* ISSN: 2278-3075, Volume-8 Issue-10, August 2019

- Elhassnaoui, I., Moumen, Z., 2019. Generation of Synthetic Design Storm Hyetograph and Hydrologic Modeling under HEC HMS for Ziz Watershed, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)* ISSN: 2278-3075, Volume-8 Issue-10, August 2019
- Feng Y, Lei Z, Tong X, Gao C, Chen S, Wang J, Wang S (2020) Spatially-explicit modeling and intensity analysis of China's land use change 2000–2050. *J Environ Manag* 263:110407
- Fan F, Wang Y, Wang Z (2008) Temporal and spatial change detecting (1998–2003) and predicting of land use and land cover in Core corridor of Pearl River Delta (China) by using TM and ETM+ images. *Environ Monit Assess* 137(1-3):127–147
- Fakharany, N., Mansour, N. 2021. Morphometric analysis and flash floods hazards assessment for Wadi Al Aawag drainage Basins, southwest Sinai, Egypt. *Environmental Earth Sciences* (2021) 80:168 <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09457-1>
- Gebremicael, T.G., Mohamed, Y.A., Betrie, G.D., Zaag, P., Teferi, E., 2013. Trend analysis of runoff and sediment fluxes in the Upper Blue Nile basin: a combined analysis of statistical tests, physically-based models and landuse maps. *Hydrology* 482, 57–68.
- Han J, Hayashi Y, Cao X, Imura H (2009) Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: a case study of Shanghai, China. *Landsc Urban Plan* 91(3):133e141
- Hamad, R., Heiko, B. 2018. Predicting Land Use/Land Cover Changes Using a CA-Markov Model under Two Different Scenarios, *Sustainability* 2018, 10, 3421; doi:10.3390/su10103421
- Houet, T.; Hubert-Moy, L., (2006). Modeling and projecting land-use and land-cover changes with Cellular Automaton in considering landscape trajectories. *EARSeL eProceedings*, 5(1): 63-76 (14 pages)
- Huang, W., Liu, H., Luan, Q., Jiang, Q., Liu, J., Liu, H., 2008. Detection and prediction of land use change in Beijing based on remote sensing and GIS. *Int. Arch. Photogram. Rem. Sens. Spatial Inf. Sci.* XXXVII, 75–82.
- Huang, Y., Yang, B., Wang, M., Liu, B., & Yang, X., (2020). Analysis of the future land cover change in Beijing using CA–Markov chain model, *Environmental Earth Sciences*, 79, 60
- Hawkins, R.H.; Jiang, R.; Woodward, D.E.; Hjelmfelt, A.T.; Van Mullem, J.A. (2002). *Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, Nevada.* 42 (3): 629–643. doi:10.1111/j.1752-1688.2006.tb04481
- Koutsoyiannis D., and Manetas A. 1998. A mathematical framework for studying rainfall intensity – duration – frequency relationships, *Journal of Hydrology*, 206: 118-135
- Khalid Hussein, Khaula Alkaabi, Dawit Ghebreyesus, Muhammed Usman Liaqat, *Land use/land cover change along the Eastern Coast of the UAE and its impact on flooding risk., GEOMATICS, NATURAL HAZARDS AND RISK 2020, VOL. 11, NO. 1, 112–130* <https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1707718>
- Munthali, M. G.; Davis, N.; Adeola, A.M.; Botai, J.O.; Kamwi, J. M.; Chisale, H.L.; Orimoogunje, O.O., (2019). Local Perception of Drivers of Land-Use and Land-Cover Change Dynamics across Dedza District, Central Malawi Region. *Sustainability*, 11(3): 832 (25 pages)

- Matlodi.B, Kenabatho.B,2021.Analysis of the Future Land Use Land Cover Changes in the Gaborone Dam Catchment Using CA-Markov Model: Implications on Water Resources, *Remote Sens.* 2021, 13, 2427. <https://doi.org/10.3390/rs13132427>
- Muller, M.R., Middleton, J., 1994. A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara region, Ontario, Canada. *Landscape Ecol.* 9 (2), 151–157
- Mitsova, D., Shuster, W., & Wang, X., (2011). A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation, *Landscape and Urban Planning*, 99, 141- 153.
- Nikoo,m. R.M. et al. (2020). Analyses of land use land cover (LULC) change and built-up expansion in the suburb of a metropolitan city: Spatio-temporal analysis of Delhi NCR using landsat datasets. *Journal of Urban Management* 9 (2020) 347–359.
- Nigussie, T.A., Altunkaynak, A., 2016. Assessing the hydrological response of Ayamama watershed from urbanization predicted under various landuse policy scenarios. *Water Resour. Manage.* 30, 3427–3441. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1360-4>.
- Neale, C. M. U. , Maltese, A. , Salcedo, S. M. B. , Suson, P. D. , Milano, A. E. , & Ignacio, M. T. T. (2016). Spie proceedings [spie spie remote sensing - edinburgh, united kingdom (monday 26 september 2016)] remote sensing for agriculture, ecosystems, and hydrology xviii - impact of dynamically changing land cover on runoff process: the case of iligan river basin., 9998, 99980V. <https://doi.org/10.1117/12.2241273>.
- Palmate SS (2017) Modelling spatiotemporal land dynamics for a transboundary river basin using integrated Cellular Automata and Markov Chain approach. *Appl Geogr* 82:11–23
- Poelmans, L., Rompaey, A.V., Batelaan, O., 2010. Coupling urban expansion models and hydrological models: how important are spatial patterns? *Land Use Policy* 27, 965–975. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.12.010>
- Ruben. B, Zhang,K. 2020. Analysis and Projection of Land-Use/Land-Cover Dynamics through Scenario-Based Simulations Using the CA-Markov Model: A Case Study in Guanting Reservoir Basin, China. *Sustainability* 2020, 12, 3747; doi:10.3390/su12093747
- Stephens, L., Fuller, D., Boivin, N., et al. (2019). Archaeological assessment reveals Earth's early transformation through land use. *Science*, 365, 897–902
- Subedi, P.; Subedi, K.; Thapa, B., (2013). Application of a Hybrid Cellular Automaton–Markov (CA-Markov) Model in land use change prediction: A case study of Saddle Creek Drainage Basin, Florida. *Appl. Ecol. Environ. S*, 1(6): 126-132 (7 pages).
- Singh, A. K., (2003). Modelling land use land cover changes using cellular automata in a geo-spatial environment. Master of Science Thesis, International Institute for GeoInformation Science and Earth Observation. Enscheda. The Netherlands.
- Smithers J, Schulze R (2001) A methodology for the estimation of short duration design storms in South Africa using a regional approach based on Lmoments. *Journal of Hydrology* 241(1-2):42-52
- Tudun-Wada MI, Tukur YM, YaU HMZS, Musa I, Lekwot VE (2014) Analysis of forest cover changes in Nimbia forest reserve, Kaduna State, Nigeria using geographic information system and remote sensing techniques. *Analysis* 4(21):73–83
- Varga OG, Pontius RG Jr, Singh SK, Szabó S (2019) Intensity analysis and the Figure of Merit's components for assessment of a cellular automata Markov simulation model. *Ecol Indic* 101:933–942. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.057>

- Verma AK, Jha MK, Mahana RK. Evaluation of HEC-HMS and WEPP for simulating watershed runoff using remote sensing and geographical information system. *Paddy and Water Environment*, 2010; 8:131–144.
- Yuqin Gao, A. Chen.J., 2020. Prediction of hydrological responses to land use change. *Science of the Total Environment* 708 (2020) 134998
- Ye, X., Jian, L., Qi, Z., 2011. A modeling study of hydrological response to landusechanges based on hypothetical scenarios for the Poyang Lake catchment. *International Symposium on Water Resource & Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1109/ISWREP.2011.589>
- Yuan, Y., Gao, Y., Wu, X., 2015. Flood simulation of flood control model for polder type based on HEC-HMS hydrological model in Qinhuai River Basin. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)* 37, 34–39. <https://doi.org/10.13393/j.cnki.issn.1672-948X.2015.05.009>.

