

شبیه‌سازی هیدروگراف سیل و تحلیل ارتباط آن با سنجه‌های سیمای سرزمین در حوضه آبخیز عموقین، استان اردبیل

شهناز میرزایی^۱، اباذر اسمعلی^۲، رئوف مصطفی‌زاده^{۳*}، اردوان قربانی^۴، سجاد میرزایی^۵

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

۲ و ۴. دانشیار گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

۳. استادیار گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

۵. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۱/۲۳؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۳/۳۰)

چکیده

شناخت فرایند سیلاب از نظر خصوصیات مؤثر کاربری اراضی ضروری است. به این منظور، سنجه‌های سیمای سرزمین برای کمی‌کردن خصوصیات مکانی لکه‌ها و کلاس‌های کاربری اراضی در سیمای سرزمین کاربرد دارند و می‌توانند در درک آثار فعالیت‌های انسانی مفید باشند. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی کارآمدی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی بارش - رواناب حوضه آبخیز عموقین و ارتباط و همبستگی بین سنجه‌های سیمای سرزمین و مؤلفه‌های هیدروگراف است. به این منظور، مدل HEC-HMS با روش SCS-CN در تلفات، روش هیدروگراف واحد SCS در تبدیل بارش- رواناب و روش ماسکینگام در روندیابی اجرا شد. پارامترهای ورودی مدل در شش رویداد با تابع هدف نش- ساتکلیف بهینه شده و در سه رویداد دیگر اعتبارسنجی شد. مدل با بارش طرح ۲۵ ساله اجرا و مؤلفه‌های هیدروگراف شبیه‌سازی شده استخراج شد و سنجه‌های سیمای سرزمین با استفاده از نرم‌افزار Fragstats در سطح سیما کمی شدند. سنجه‌های مناسب سیمای سرزمین با روش PCA و براساس هدف تحقیق انتخاب و تحلیل همبستگی و رگرسیون در محیط برنامه‌نویسی R انجام شد. براساس نتایج، میانگین معیار نش- ساتکلیف به میزان ۰/۶۳ در اعتبارسنجی نشان‌دهنده توانایی مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف است. همبستگی مستقیم دبی اوج، حجم رواناب و زمان پایه با سنجه سطح سیما (TA) و اندازه شبکه تأثیرگذار (MESH) وجود داشت و رابطه اوج هیدروگراف با سنجه سطح سیما (TA)، تراکم لکه (PD) و شیب مستقیم و معنادار ($p\text{-value} < 0.01$) ارزیابی شد، در حالی که دبی اوج با مساحت کاربری مرتع همبستگی معکوس معنادار را نشان داد. مؤلفه زمان تا اوج نیز با سنجه تراکم لکه (PD) و طول آبراهه همبستگی مستقیم داشت.

کلیدواژگان: تحلیل همبستگی، تراکم لکه، حوضه آبخیز عموقین، سنجه سیمای سرزمین، شبیه‌سازی بارش- رواناب.

مقدمه

سیل به‌عنوان پدیده‌ای که سبب خسارت‌های جانی و اقتصادی می‌شود، اهمیت زیادی دارد و از پیچیده‌ترین و مخرب‌ترین رویدادهای طبیعی است که بیش از هر بلای طبیعی دیگر، جان انسان‌ها و شرایط اجتماعی و اقتصادی را به خطر می‌اندازد [۱-۳]. سیل ارتفاع آب غیر معمول در رودخانه بر اثر رواناب ناشی از بارش باران و یا ذوب مقدار زیاد برف محبوس‌شده در ارتفاعات و واردشدن آن به سطح نرمال آب رودخانه است [۱]. پیش‌بینی وقوع سیلاب به مطالعه عوامل مختلف ایجادکننده آن نیاز دارد و باید سهم هر یک از عوامل در تولید سیلاب مشخص شود. از جمله این عوامل می‌توان به خصوصیات بارندگی، توپوگرافی، مورفولوژی رودخانه، خصوصیات سیمای سرزمین، ساختارهای محیطی و فعالیت‌های بشری اشاره کرد [۴]. یکی از تأثیرات مهم فعالیت بشری در بروز سیل، تغییر کاربری اراضی، نبود مدیریت صحیح و استفاده نامناسب از توان اراضی است [۵].

مدل‌سازی هیدرولوژیکی معمولاً ابزاری است که به‌وسیله آن برنامه‌ریزان منابع آب از پاسخ هیدرولوژیکی یک حوضه طی بارش برای مدیریت منابع آب حوضه استفاده می‌کنند و برای درک تأثیرات انسان بر جریان رودخانه، ارزیابی و پیش‌بینی آب رودخانه‌ها طی تغییرات آب و هوایی و پیش‌بینی خطر سیل به‌منظور طراحی مدیریت اکولوژیکی پایدار و توسعه استراتژی‌های مقابله با تغییرات محیطی ضروری است [۲، ۴، ۶ و ۷]. حوضه آبخیز هم به‌عنوان یک هیدروسستم، عامل تبدیل بارش به رواناب و تخلیه آن به نقطه خروجی است و در تبدیل بارش به رواناب به‌عنوان پتانسیل جریان سطحی دخالت تعیین‌کننده‌ای دارد [۸]. مدل HEC-HMS^۱ نسخه جدید مدل HEC-1 است که از نخستین سری نرم‌افزارهای تهیه‌شده توسط مرکز هیدرولوژی مهندسی آمریکا در سال ۱۹۶۸ بوده است [۹]. این مدل، حوضه آبخیز را به‌عنوان یک سیستم به‌هم‌پیوسته با مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی نمایش می‌دهد. هر مؤلفه در مدل، یک جنبه از فرایند بارش-رواناب را در هر زیرحوضه شبیه‌سازی می‌کند. در این مدل رابطه‌ای از رواناب سطحی منظور می‌شود که بر مبنای هیتوگراف بارش ورودی عمل

می‌کند. بارش مازاد پس از محاسبه تلفات بر اساس توابع خاصی مانند شماره منحنی^۲ (CN) در روش سرویس حفاظت خاک (SCS) محاسبه می‌شود. بارش مازاد به‌دست‌آمده، تبدیل به آب‌نمود واحد شده و سپس آب‌نمود رواناب خروجی از هر زیرحوضه استخراج می‌شود. تحلیل داده‌های هواشناسی در مدل هواشناسی، که از دو جزء بارندگی و تبخیر و تعرق تشکیل شده است، صورت گرفته و کنترل محدوده زمانی شبیه‌سازی در مؤلفه مشخصه کنترل انجام می‌پذیرد [۹].

ساختار سیمای سرزمین و ترکیب آن در بعد مکان و زمان مدام در حال توسعه و تغییر است و این تحولات مربوط به تعامل پیچیده محیط طبیعی و فعالیت‌های انسانی است که نتیجه آن سبب تغییر در پایداری مؤلفه‌های منحصربه‌فرد ساختار مکانی سیمای سرزمین شده است و پیامدهای اقتصادی-اجتماعی و زیست‌محیطی متعددی را نیز در پی دارد [۵، ۱۰ و ۱۱]. سیمای سرزمین چیدمانی است که در آن ترکیبی از اکوسیستم‌های محلی یا کاربری‌های سرزمین در یک منطقه و در یک فرم مشابهی تکرار شده‌اند [۱۲]. در واقع، سطحی از زمین است که لکه‌های مختلفی را در بر دارد و با عنوان موزاییکی از لکه‌ها^۳ یا موزاییک مؤلفه‌های سیمای سرزمین^۴ نامیده می‌شود [۱۳]. سنجه‌های سیمای سرزمین^۵، که برای کمی‌کردن خصوصیات مکانی لکه‌ها، کلاس‌های کاربری اراضی و موزاییک‌های کل سیمای سرزمین به کار می‌روند، ابزار مناسبی برای مقایسه وضعیت سیمای سرزمین‌های مختلف هستند و نیز به‌عنوان شاخص‌های توسعه‌یافته برای یافتن الگوی نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده به کار می‌روند [۱۳]. به‌طور معمول، سنجه‌های سیمای سرزمین در سه سطح لکه^۶ برای ویژگی‌های مکانی و بافت لکه‌های منفرد، کلاس^۷ برای مجموعه لکه‌های مربوط به طبقه‌ای خاص و سیمای^۸ برای برآیند ویژگی‌های لکه‌ها و طبقات در کل محدوده تعریف و محاسبه می‌شوند [۱۴]. سنجه‌ها ابزار مناسبی

2. Curve Number (CN)

3. Mosaics of patches

4. Mosaics of landscape elements

5. Landscape Metric

6. Patch

7. Class

8. Landscape

1. Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)

افزایش یافته است. همچنین، با افزایش پوشش جنگلی زمان تا اوج کاهش یافته است. وان‌نیون‌هایس^۱ و همکارانش ارتباط سنج‌های سیمای سرزمین و خصوصیات هیدرولوژیکی در Leuven بلژیک را بررسی کردند [۱۷]. ایشان پس از شبیه‌سازی رواناب خروجی با مدل هیدرولوژیکی سطحی و محاسبه ۲۳ سنج، سنج‌های مناسب را با PCA^۲ تعیین کردند. نتایج پژوهش پژوهش آنها نشان داد ارتباط سنج‌های سیمای سرزمین و خصوصیات هیدرولوژیکی معنادار است. در تحلیل تغییر کاربری و آثار اکولوژیکی آن در Wuhan چین با استفاده از نرم‌افزار تحلیل مکانی Fragstats، سیمی کابا و لی^۳ سنج‌های اکولوژیکی را در دو سطح سیما و کلاس برای دو دوره زمانی به‌دست آوردند و بر اساس سنج‌های اکولوژیکی سطح سیما بیان کردند که در دوره ۱۹۸۷-۱۹۹۴ جداسازی شدیدی در دوره ۱۹۹۴-۲۰۰۵ ضعیف‌تر بوده است [۱۸]. در پژوهشی دیگر، گیرالدو^۴ مقیاس مکانی و تکه‌تکه شدن کاربری‌ها در پایش فرایند آب در کلمبیا را بررسی کرد [۱۹]. وی پس از تجزیه و تحلیل آماری و مقایسه تکه‌های کاربری‌های ایجاد شده به این نتیجه رسید که لکه‌های کاربری متنوع اثر معناداری در فرایندهای هیدرولوژیک دارند. تاپوکوا و همکارانش سنج‌های سیمای سرزمین را برای سال‌های ۱۸۲۵، ۱۹۶۸ و ۲۰۰۶ در Hustopece محاسبه کردند و به افزایش روند استفاده از اراضی برای کشاورزی در درازمدت اشاره کردند [۱۱]. کانگ^۵ و همکارانش بعد از محاسبه سنج‌های سیمای سرزمین در چهار دوره در Oguraike ژاپن به این نتیجه رسیدند که تنوع در سیمای سرزمین کاهش یافته و نواحی شهری، علفزار، شالیزار و مرتع در داخل لکه‌های بزرگ متمرکز شده‌اند و جداسازی در اکوسیستم‌های آبی اتفاق افتاده است [۲۰].

از جمله مطالعات انجام شده در داخل کشور در زمینه شبیه‌سازی بارش-رواناب و تحلیل الگوی کاربری اراضی و سنج‌های سیمای سرزمین هم می‌توان به مطالعه مصطفی‌زاده و همکارانش اشاره کرد [۲۱]. آن‌ها در ارزیابی

برای طراحی و یافتن ارتباط دقیق بین ساختار و عملکرد کاربری‌های مختلف سیمای سرزمین‌اند [۱۵]. از روش‌های محاسبه سنج‌های سیمای سرزمین می‌توان به نرم‌افزار Fragstats اشاره کرد که استفاده از آن به دلیل قابلیت بیشتر و محاسبه تعداد بیشتری از سنج‌های سیمای سرزمین، معمول‌تر است [۱۳].

از جمله مطالعات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی بارش-رواناب و تحلیل الگوی کاربری اراضی و سنج‌های سیمای سرزمین در خارج از کشور می‌توان به مطالعه علی و همکارانش اشاره کرد [۱۶]. آن‌ها به شبیه‌سازی آثار تغییر کاربری بر رواناب با استفاده از مدل HEC-HMS در اسلام‌آباد پاکستان پرداختند و بیان کردند که تغییر کاربری با این روند در آینده سبب افزایش رواناب کل تا ۵۱/۶ درصد و دبی اوج تا ۴۵/۴ درصد می‌شود. هالواتورا و ناجیم در مناطق گرمسیری Attanagalu Oya، کاربرد مدل HEC-HMS را بررسی کردند و در محاسبه تلفات از روش‌های شماره منحنی SCS و کمبود اولیه و میزان ثابت تلفات و در محاسبه رواناب از دو روش کلارک و اشنایدر استفاده کردند [۴]. ایشان بعد از واسنجی و اعتبارسنجی مدل با ضرایب ارزیابی، روش اشنایدر را برای محاسبه رواناب در حوضه مطالعه شده مناسب دیدند. در پژوهش دیگر سمپات و همکارانش شبیه‌سازی رواناب در رودخانه Deduru Oya در سریلانکا را با مدل HEC-HMS انجام دادند [۲]. آن‌ها از روش احتساب‌کننده رطوبت خاک، هیدروگراف واحد کلارک و روش خشکیدگی به ترتیب در بخش تلفات، تبدیل بارش به رواناب و جریان پایه استفاده کردند و بیان کردند که مدل توانایی شبیه‌سازی رواناب در منطقه گرمسیری در شرایط انحراف بخشی از جریان رودخانه‌ای را دارد. لگس کبر از روش‌های کمبود اولیه و میزان ثابت تلفات، هیدروگراف واحد اشنایدر و روش فروکش‌نمایی به ترتیب برای محاسبه تلفات، رواناب و دبی پایه کاربرد مدل HEC-HMS در رودخانه Blue Nile واقع در اتیوپی استفاده کرد و بعد از تأیید مدل، اجرای آن در شرایط تغییر کاربری را توصیه کرد [۶].

در زمینه کمی‌سازی الگوی کاربری اراضی واکر [۵]، با بررسی الگوی کاربری اراضی و خصوصیات هیدروگراف به این نتیجه رسید که با افزایش توسعه، زمان تا اوج هیدروگراف خروجی کاهش یافته و اوج هیدروگراف

1. Van Nieuwenhuysse
2. Principle Components Analysis
3. Simbay Kabba & Li
4. Giraldo
5. Kang

همکارانش در مدل سازی اثر نوع و الگوی پراکنش مکانی کاربری اراضی بر تغییرات آبنمود جریان از مدل زمان-مساحت کلارک برای حوضه آبخیز گلاز اشنویه استان آذربایجان غربی استفاده کردند [۲۷]. نتایج پژوهش آنها نشان دهنده تأثیر موقعیت و مساحت کاربری های اراضی در هیستوگرام زمان-مساحت و در نتیجه در تغییرات آبنمود رگبار بوده است. نوحه گر و همکارانش به تحلیل کاربری سرزمین در بخش مرکزی گیلان در شرایط موجود پرداختند [۲۸]. نتایج پژوهش آنها نشان داد بر اثر دخل و تصرف انسان، ساختار سیمای سرزمین ریزدانه تر، تعداد لکه های انسان ساخت و نیمه طبیعی افزایش و اتصال و پیوستگی سیمای سرزمین کاهش یافته است.

در سال های اخیر، نگرانی درباره آثار تغییر الگوی کاربری اراضی ناشی از جنگل زدایی، احداث جاده، انتقال کشاورزی به اطراف منابع آب، افزایش حجم ساخت و ساز و توسعه مناطق مسکونی موجب ایجاد بحران جدی شده است. تمرکز اصلی آثار تغییر کاربری بر منابع آب، خطرات هیدرولوژیکی محلی و پایین دست و حفظ تنوع زیستی است [۲ و ۱۱]. به بیانی، یکی از تأثیرات مهم فعالیت بشری در بروز سیل نیز، تغییر کاربری اراضی، نبود مدیریت صحیح و استفاده نامناسب از اراضی است. فعالیت های اقتصادی و انسانی هم به طور عمده در مقیاس سیمای سرزمین صورت می گیرد و سیمای سرزمین به عنوان مقیاس مکانی مناسب برای مطالعه روی تغییرات زیست محیطی در نتیجه فعالیت های انسانی است [۱۰]. بنابراین، موضوع کمی کردن الگوی پراکنش لکه های کاربری و تجزیه و تحلیل های مکانی مربوط به آن برای درک تغییر و تحولات سیمای سرزمین در آینده و نیز ارتباط آن با فرایندهای تولید، تشدید و یا کنترل رواناب می تواند راهگشا باشد. از این رو، رفتار سیل در کاربری های مختلف اراضی به خصوص در آبخیزهای بدون آمار و اهمیت آن در برنامه های مدیریت آبخیز و پروژه های حفاظت آب و خاک اهمیت دارد. حوضه آبخیز عموقین در دامنه های شرقی کوه سبلان واقع شده است. بالادست حوضه کوهستانی است و اغلب پوشش مرتعی دارد و پایین دست حوضه کاربری کشاورزی دارد. بنابراین، پیش بینی سیل و بررسی الگوی مکانی کاربری های مختلف به دلیل شرایط توپوگرافیکی و بیلاقی بودن حوضه آبخیز عموقین اهمیت

آثار هیدرولوژیکی طرح آبخیزداری در جعفرآباد استان گلستان با استفاده از مدل HEC-HMS، مؤلفه های هیدروگراف های شبیه سازی شده در دوره بازگشت های مختلف در دو وضعیت قبل و بعد از عملیات آبخیزداری را محاسبه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد با افزایش دوره بازگشت سیلاب، تأثیر سازه ها بر کاهش دبی اوج و حجم سیلاب کاهش یافته است. رضوی زاده و همکارانش شبیه سازی جریان سیل با مدل HEC-HMS در حوضه آبخیز طالقان استان تهران در سال های ۱۳۶۶ و ۱۳۸۱ انجام داده و اثر تغییر کاربری بر سه پارامتر دبی اوج، حجم سیل و زمان پایه سیل را بررسی کردند [۲۲]. نتایج پژوهش آنها نشان دهنده کاهش دبی اوج و حجم سیل در سال ۱۳۸۱ نسبت به ۱۳۶۶ با کاهش سطح اراضی کشاورزی و افزایش مراتع بوده است. وهاب زاده و همکارانش در بررسی اثر تغییر کاربری بر رژیم جریان رودخانه آجرلو در استان آذربایجان غربی با مدل HEC-HMS و استفاده از روش شماره منحنی و هیدروگراف واحد SCS، به این نتیجه رسیدند که طی این دوره وسعت اراضی مرتعی کاهش و اراضی کشاورزی افزایش یافته است [۲۳].

به منظور بررسی روند تغییرات سیمای سرزمین در حوضه آبخیز نکا واقع در محدوده استان های مازندران، گلستان و سمنان، طالبی امیری و همکارانش با تجزیه و تحلیل سنجه های سیمای سرزمین، تبدیل گسترده زمین های جنگلی و کشاورزی در منطقه به پوشش مرتعی را طی سال های ۱۳۵۶ تا ۱۳۸۱ گزارش کردند [۲۴]. در مطالعه ای در استان مازندران، میرزایی و همکارانش پس از استخراج سنجه ها در دو سطح کلاس و سیمای، از تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) برای انتخاب سنجه های مناسب استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها بیان کننده افزایش مساحت در پوشش های مسکونی، کشاورزی، مرتع و افت شدید در جنگل های استان بوده است [۲۵]. آرخی و فتحی زاد در بررسی روند تغییرات سیمای سرزمین و آنالیز گسستگی چشم انداز در حوضه دویرج استان ایلام سنجه های سیمای سرزمین را در سطح کلاس با استفاده از نرم افزار Fragstats محاسبه کردند [۲۶]. نتایج پژوهش آنها نشان داد تعداد لکه ها و کاهش میانگین مساحت دو شاخص مهم تجزیه بوده و روند تخریب و تجزیه سیمای سرزمین به صورت افزایشی بوده است. مصطفی زاده و

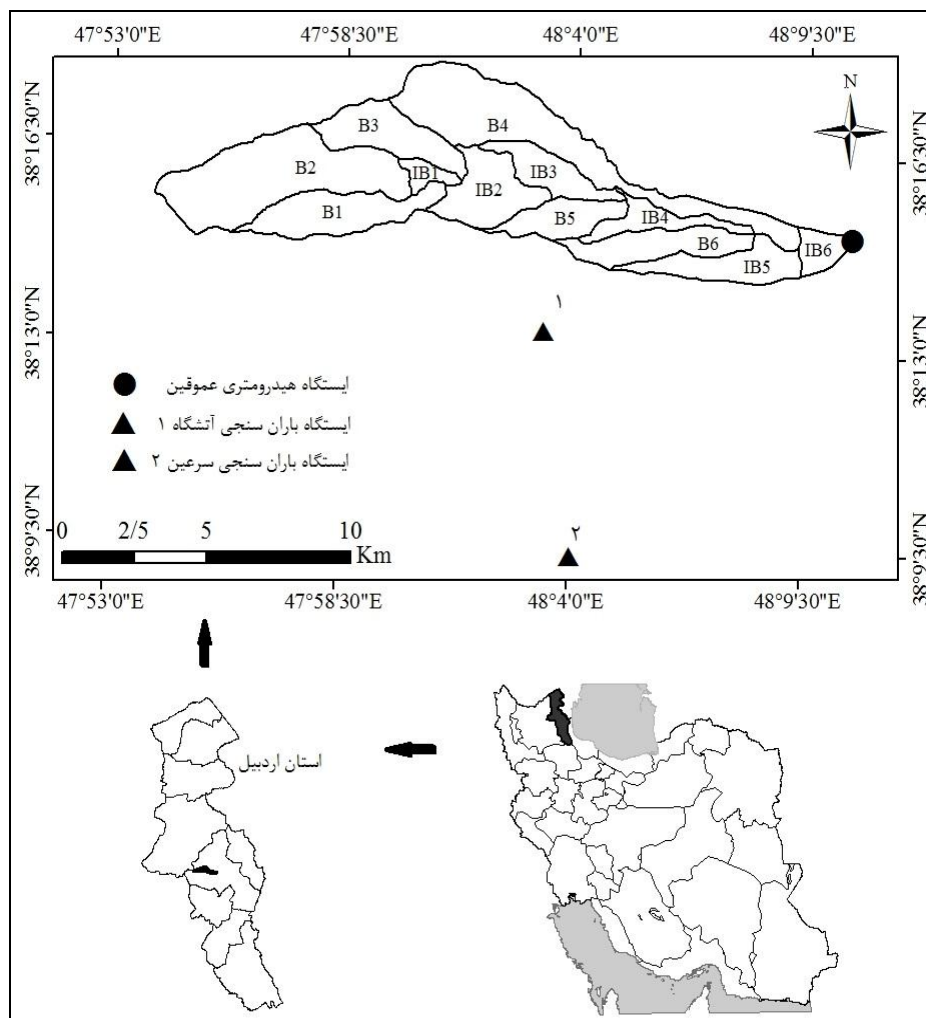
یدی‌بولیک چای شهرستان اردبیل واقع شده است. کمترین و بیشترین ارتفاع منطقه به ترتیب برابر ۱۴۳۶ و ۳۸۴۸ متر است و قسمت درخور توجهی از منطقه را کاربری کشاورزی آبی و دیم با شیب ۱-۲۵ درصد تشکیل می‌دهد. خاک منطقه جزء گروه‌های هیدرولوژیکی B, C و D است و در زون زمین‌ساختی آتشفشانی دوران سوم قرار دارد که آتشفشان‌های جدید نئوژن و کواترنر روی سنگ‌های آتشفشانی قدیمی‌تر قرار دارند. در تجزیه و تحلیل‌های هیدرولوژیکی از آمار ایستگاه هیدرومتری عموقین در خروجی حوضه و ایستگاه باران‌سنجی آتشفشان سرعین در مجاورت حوضه استفاده شده است. شکل ۱ موقعیت حوضه آبخیز عموقین در استان اردبیل و واحدهای هیدرولوژیکی مطالعه‌شده را نشان می‌دهد.

خواهد داشت. هدف پژوهش حاضر، شبیه‌سازی جریان سیل با استفاده از مدل HEC-HMS در حوضه آبخیز عموقین و کمی‌کردن الگو و ساختار کاربری اراضی حوضه مطالعه‌شده با نرم‌افزار Fragstats است. همچنین، در ادامه ارتباط بین سنج‌های سیمای سرزمین و مؤلفه‌های هیدروگراف سیل خروجی، که متأثر از ویژگی‌های فیزیکی حوضه و الگوی کاربری‌های مختلف اراضی است، ارزیابی و تحلیل شده است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعاتی

حوضه آبخیز عموقین با مساحتی حدود ۷۸۶۰ هکتار در محدوده جغرافیایی $47^{\circ} 54'$ تا $48^{\circ} 10'$ طول شرقی و $38^{\circ} 14'$ تا $38^{\circ} 18'$ عرض شمالی و روی رودخانه



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز عموقین در استان اردبیل و واحدهای هیدرولوژیکی مطالعه‌شده

تجربی و پیش فرض برابر با ۲۰ درصد بیشترین پتانسیل نگهداشت (S) در نظر گرفته شد که در مطالعات رضوی زاده و همکارانش [۲۲]، رضازاده و همکارانش [۲۹] و نبل و همکارانش [۳۲] نیز از این ضریب در محاسبه تلفات استفاده شده است. بیشترین پتانسیل نگهداشت از رابطه ۱ برآورد شده است [۸، ۳۳ و ۳۴].

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (1)$$

که در آن CN، شماره منحنی است. درصد اراضی نفوذناپذیر در هر زیرحوضه مطالعاتی نیز بر اساس درصد اراضی توده سنگی و مسکونی با استفاده از نقشه کاربری ارضی به دست آمد. زمان تأخیر حوضه آبخیز فاصله زمانی بین مرکز ثقل بارش مازاد و زمان اوج است. با توجه به روش هیدروگراف واحد بی بعد SCS زمان تأخیر طبق رابطه ۲ در سیستم متریک برای هر یک از واحدهای هیدرولوژیکی حوضه آبخیز عموقین محاسبه شده است. همچنین، در این روش، زمان تا اوج و دبی اوج به ترتیب براساس روابط ۳ و ۴ محاسبه می شود [۳۵].

$$T_{lag} = \frac{2.587 \times L^{0.8} \times \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0.7}}{1900W_s^{0.5}} \quad (2)$$

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + T_{lag} \quad (3)$$

$$Q_p = 2.08 \times \frac{A}{T_p} \quad (4)$$

که در آنها، T_{lag} ، زمان تأخیر حوضه (ساعت)، L ، طول آبراهه اصلی (متر)، CN ، شماره منحنی متوسط وزنی حوضه، W_s ، شیب متوسط وزنی حوضه (درصد)، T_p ، زمان تا اوج هیدروگراف (ساعت)، Δt ، مدت زمان بارش مؤثر و فاصله زمانی محاسباتی در مدل (ساعت)، Q_p ، دبی اوج هیدروگراف (مترمکعب بر ثانیه) و A ، مساحت حوضه بر حسب کیلومترمربع است. همچنین، با استفاده از روش ماسکینگام پارامترهای k و x بر اساس ویژگی های آبراهه و جریان به ترتیب با استفاده از روابط ۵ و ۶ محاسبه شده است [۳۶].

$$k = \frac{L}{C \times 3600} \quad (5)$$

$$x = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{BS_0 CL} \right) \quad (6)$$

که در آنها، k ، ضریب ذخیره یا زمان انتقال موج سیل در

روش مطالعه هیدرولوژی و شبیه سازی هیدروگراف جریان در این پژوهش از نرم افزار HEC-HMS 4.1 برای شبیه سازی جریان و استخراج مؤلفه های هیدروگراف استفاده شده است. این مدل قابلیت کالیبراسیون پارامترها را دارد و پس از اعتباریابی می تواند برای شبیه سازی جریان و پیش بینی اثر تغییر پارامترها به کار رود [۹]. برای تعیین مرز هیدرولوژیکی حوضه از نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ با فواصل خطوط تراز ۲۰ متر با توجه به موقعیت ایستگاه هیدرومتری عموقین در خروجی حوضه استفاده شد و براساس شرایط هیدرولوژیکی مسیر آبراهه و شاخه های آن و توپوگرافی، حوضه آبخیز عموقین به ۱۲ واحد هیدرولوژیکی تقسیم شد. در ادامه، با استفاده از خطوط تراز رقوم شده ۱:۵۰۰۰۰، مدل ارتفاعی رقومی حوضه (DEM) تهیه و خصوصیات فیزیوگرافی حوضه در محیط ArcGIS 10.1 استخراج شد. در این مدل، مؤلفه های مختلفی برای شبیه سازی سیستم فیزیکی و در نهایت هیدروگراف خروجی حوضه ترکیب می شوند [۹]. سه مؤلفه اساسی این مدل شامل مدل حوضه، مدل هواشناسی و مشخصه های کنترل است. خواص فیزیکی حوضه آبخیز، زیرحوضه ها، رودخانه ها و تأسیسات وابسته به آنها در مدل حوضه به نرم افزار معرفی می شود و محاسبات مربوط به تعیین میزان تلفات، تبدیل بارش مازاد به رواناب، مقدار جریان پایه و شبیه سازی جریان در کانال ها و مخازن و روندیابی آنها نیز در مدل حوضه انجام می پذیرد. بنابراین، در این پژوهش در بخش تلفات، روش شماره منحنی SCS، در بخش تبدیل بارش به رواناب، روش هیدروگراف واحد SCS و در بخش روندیابی، روش ماسکینگام انتخاب شد [۴، ۲۳ و ۲۹].

پارامترهای ورودی مدل HEC-HMS براساس روش انتخاب شده شامل شماره منحنی، تلفات اولیه و درصد اراضی نفوذناپذیر در محاسبه تلفات، زمان تأخیر در بخش تبدیل بارش به رواناب و ضرایب k و x در روندیابی رودخانه است. شماره منحنی نشان دهنده پتانسیل رواناب حوضه بوده و نقشه شماره منحنی حوضه از تلفیق نقشه کاربری اراضی (مستخرج از تصاویر Google Earth)، نقشه گروه های هیدرولوژیکی خاک، نقشه اجزای واحد اراضی خاک و تعیین وضعیت رطوبت پیشین رگبار تهیه شد [۳۰ و ۳۱]. سپس، میزان تلفات اولیه هر زیرحوضه به روش SCS-CN، به طور

رابطه ۸ و ریشه میانگین مربعات خطا^۲ رابطه ۹ استفاده شده است.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{si} - Q_{oi}| \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2} \quad (9)$$

که در آنها، Q_{si} ، دبی شبیه‌سازی‌شده و Q_{oi} ، دبی مشاهداتی است.

پس از واسنجی و اعتبارسنجی و تأیید کارایی مدل در شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب در حوضه آبخیز عموقین، به‌منظور استخراج مؤلفه‌های هیدروگراف (دبی اوج، حجم رواناب، زمان تا اوج و زمان پایه) بارش طرح شش‌ساعته با دوره بازگشت ۲۵ سال محاسبه و مدل HEC-HMS اجرا شد. بارش طرح معمولاً با مشخصه‌های تداوم بارش، مقدار بارش، توزیع زمانی و توزیع مکانی بارش معرفی می‌شود [۳۸]. در طراحی بهینه، که رواناب به‌دست‌آمده از کلیه قسمت‌های آبخیز را در نظر دارد، باید مدت رگباری که سبب دبی اوج می‌شود، مساوی یا بزرگ‌تر از زمان تمرکز حوضه باشد. بنابراین، با توجه به اینکه زمان تمرکز محاسباتی برای حوضه مطالعه‌شده بر اساس روابط زمان تأخیر SCS، رابطه کریپچ^۳ و رابطه کالیفرنیا^۴ کمتر از شش ساعت بود و با درنظرداشتن اینکه الگوی زمانی بارش انتخاب‌شده برای تداوم شش‌ساعته ارائه شده است، تداوم بارش طرح شش ساعت در نظر گرفته شد [۳۸ و ۳۹]. با توجه به اینکه بیشتر اقدامات آبخیزداری و مطالعات کنترل رواناب و رسوب برای دوره بازگشت ۲۵ سال طراحی و اجرا می‌شوند، در این پژوهش مدل‌سازی جریان برای دوره بازگشت ۲۵ سال انجام شد. بنابراین، در برآورد مقدار بارش طرح از داده‌های بارش حداکثر ۲۴ ساعته ایستگاه آتشیگاه با استفاده از نرم‌افزار Easy Fit 5.5، از آزمون‌های نکویی برازش کلموگراف اسمیرنف، آندرسون-دارلینگ^۵ و کای-اسکوئر^۶ برای ارزیابی تشابه خصوصیات توزیع آماری داده‌ها با توزیع مد نظر استفاده شد. پس از بررسی توزیع‌های به‌دست‌آمده هر آزمون در سطح معناداری یک درصد و کمترین مجموع رتبه در جمع رتبه‌های هر یک از

بازه روندیابی (ساعت)، L ، طول بازه روندیابی (متر)، C ، سرعت موج سیل (متر بر ثانیه) که به صورت $C = \beta \cdot V$ بیان می‌شود (V ، سرعت جریان در رودخانه و β ، ضریب تبدیل سرعت رودخانه به سرعت موج)، x ، ضریب وزنی بی‌بعد بیان‌کننده اثر نسبی مقدار دبی ورودی و خروجی، B ، عرض بالای مقطع رودخانه و S_0 ، شیب طولی بستر (متر بر متر) است.

پس از تهیه مدل فیزیکی حوضه و ورود پارامترهای مورد نیاز مدل HEC-HMS، به تعداد نه رویداد ساعتی متناظر بارش-رواناب از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی استخراج شد. شایان یادآوری است که مشکل ثبت داده‌های سیل ساعتی در بسیاری از آبخیزهای بالادست و کوهستانی وجود دارد و این امر در بسیاری موارد تحلیل سیل‌خیزی و نیز مدل‌سازی بارش-رواناب در مقیاس ساعتی را دچار چالش می‌کند. همچنین، بسیاری از منابع موجود نیز به‌ناچار از وقایع اندکی برای واسنجی و اعتبارسنجی نتایج استفاده کرده‌اند که برای نمونه می‌توان به مطالعات رضوی‌زاده و همکارانش [۲۲]، وهاب‌زاده و همکارانش [۲۳] و کوتسیفاکیس و همکارانش [۳۷] اشاره کرد. در ادامه، بعد از تکمیل بخش مدل حوضه، مدل هواشناسی و مؤلفه‌های شاخص کنترلی داده‌های بارش و رواناب نه رویداد متناظر وارد مدل شد و مدل برای این رویدادها اجرا شد. در ادامه، به‌منظور واسنجی مدل در این پژوهش از معیار نش-ساتکلیف به عنوان تابع هدف برای بهینه‌سازی پارامتر شماره منحنی و زمان تأخیر استفاده شد که تابع به شکل رابطه ۷ است.

$$NS = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \right) \quad (7)$$

که در آن، Q_{si} ، دبی شبیه‌سازی‌شده، Q_{oi} ، دبی مشاهداتی و \bar{Q}_o ، میانگین دبی مشاهداتی است. از نه رویداد متناظر بارش-رواناب به صورت تصادفی شش رویداد برای واسنجی و سه رویداد برای اعتبارسنجی انتخاب شد و میانگین پارامترهای واسنجی‌شده شش رویداد در مرحله اعتبارسنجی به مدل معرفی شد. در اعتبارسنجی مدل از شاخص‌های ارزیابی نش-ساتکلیف، میانگین خطای مطلق^۱

2. Root Mean Squared Error
3. Kripich
4. California
5. Anderson - Darling
6. Chi - Square

1. Mean Absolute Error

کمی سازی الگوی کاربری اراضی و استخراج سنجه های سیمای سرزمین

نقشه کاربری اراضی منطقه در محیط نرم افزار ArcGIS 10.1 بر اساس اطلاعات به دست آمده از منطقه و تصاویر ماهواره ای Google Earth تهیه و به فرمت رستری تبدیل شد. نوع پوشش اراضی حوضه آبخیز عموقین به کشاورزی آبی، کشاورزی دیم، باغ، مرتع، اراضی مسکونی و برون زد سنگی مرزبندی شد. نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز عموقین در شکل ۲ ارائه شده است.

در ادامه، برای کمی سازی الگوی کاربری اراضی و استخراج سنجه های سیمای سرزمین از نرم افزار Fragstats 4.2 در سطح سیما برای هر یک از واحدهای هیدرولوژیکی حوضه آبخیز استفاده شد. در استفاده از سنجه های سیمای سرزمین، انتخاب سنجه مناسب از میان تعدد سنجه ها اهمیت دارد که در مواردی سنجه ها هم پوشانی دارند و اطلاعات مشابهی از وضعیت سیمای سرزمین ارائه می کنند [۱۴] و [۴۱]. در این پژوهش انتخاب سنجه مناسب با استفاده از تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) و عدم همبستگی درونی انجام شد، ولی با توجه به تعدد سنجه های استخراج شده تعدادی از سنجه ها نیز بر اساس تعدد استفاده آنها در مطالعات مختلف، انتخاب آماره مناسب برخی از سنجه ها (میانگین، میانه، دامنه، انحراف معیار، ضریب تغییرات) و با در نظر داشتن هدف پژوهش انتخاب شدند [۱۴ و ۲۵]. در مجموع، به منظور تحلیل الگوی سیمای سرزمین حوضه آبخیز عموقین و تحلیل ارتباط سنجه های سیمای سرزمین و مؤلفه های هیدروگراف، در سطح سیما تعداد نه سنجه از میان ۷۲ سنجه انتخاب شد. برخی از خصوصیات سنجه های سیمای سرزمین انتخاب شده در جدول ۱ ارائه شده است.

تحلیل و تعیین درجه ارتباط سنجه های سیمای سرزمین و مؤلفه های هیدروگراف

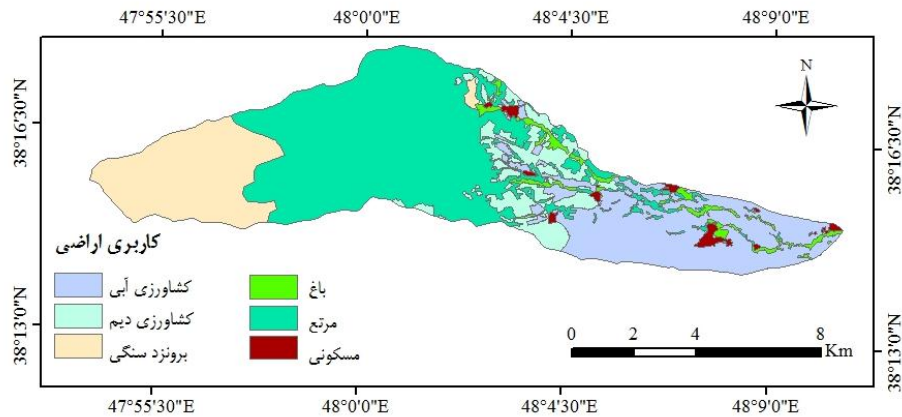
به منظور ارزیابی ارتباط بین مؤلفه های هیدروگراف و سنجه های سیمای سرزمین در هر یک از واحدهای هیدرولوژیکی از تحلیل همبستگی و رگرسیون چندمتغیره استفاده شد. تحلیل همبستگی بین مؤلفه های هیدروگراف جریان سیل و سنجه های سیمای سرزمین انتخاب شده با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون در محیط نرم افزار SPSS 16.0 صورت گرفت [۴۲]. با توجه به اینکه بیش از

توابع توزیع احتمالی آزمون ها، توزیع Burr با p -value=0.99 و مجموع رتبه ۱۵ برای محاسبه مقدار بارش در دوره بازگشت ۲۵ سال انتخاب شد. همچنین، با توجه به تداوم بارش طرح، که شش ساعت است، مقادیر بارش شش ساعته با دوره بازگشت ۲۵ سال با استفاده از رابطه ۱۰ از مقادیر بارش ۲۴ ساعته با همان دوره بازگشت محاسبه شد [۳۸].

$$P_{6,Tr} = \frac{P_{24,Tr}}{1.48} \quad (10)$$

برای بررسی الگوی تغییرات زمانی بارش از داده های بارش ایستگاه باران نگاری آتشگاه استفاده شد و با توجه به اینکه تداوم بارش شش ساعت در نظر گرفته شده است، بارش های با تداوم ۵/۵ تا ۶ ساعت به تعداد پنج بارش استخراج شد. در ادامه، برای استخراج الگوی زمانی بارش در منطقه بررسی شده از روش الگوی متوسط ترسیمی توزیع زمانی بارش ارائه شده توسط پیلگ-ریم^۱ ۱۹۷۵ استفاده شد [۴۰]. الگوی بارش شش ساعته به دست آمده با تیپ بارش استاندارد شش ساعته سازمان حفاظت خاک ایالات متحده (SCS) و سازمان هواشناسی جهانی (WMO)^۲ به صورت مقایسه بصری و بر اساس درصد بارش در زمان های مختلف از وقوع بارندگی مقایسه شد و در نهایت الگوی WMO انتخاب شد. در این پژوهش برای بررسی تغییرات مکانی بارش از روش خطوط همباران استفاده شد [۳۸]. برای بررسی گرادیان بارش از آمار بارش سالانه ۱۰ ایستگاه در محدوده حوضه آبخیز عموقین استفاده شد. بعد از تحلیل آماری و بررسی همگنی داده های بارش سالانه، رابطه گرادیان بارش در سطح معناداری یک درصد با ضریب همبستگی ۰/۸۳ استخراج شد و نقشه خطوط همباران تهیه شد. در ادامه، به منظور برازش بارش به هر یک از زیرحوضه ها از روش وزن دهی به هر زیرحوضه استفاده شد و با تعیین ضرایب بارش در هر زیرحوضه، مقدار بارش برای هر زیرحوضه را محاسبه کرده و در شبیه سازی استفاده شد.

1. Pilgrim
2. World Meteorological Organization (WMO)



شکل ۲. نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز عموقین

جدول ۱. خصوصیات سنج‌های سیمای سرزمین استفاده‌شده در تحلیل‌ها (راهنمای نرم‌افزار Fragstate 4.2، مک‌گاریگال، ۲۰۱۵)

محدوده تغییرات	واحد	فرمول محاسباتی	علامت اختصاری	نام فارسی سنج	سنج سیمای سرزمین
$TA > 0$ و بدون محدودیت	هکتار	$A \left(\frac{1}{10000} \right)$	TA	سطح سیما	Total Area
$PD > 0$ ، محدود توسط اندازه سلول	تعداد در ۱۰۰ هکتار	$\frac{N}{A} (10000)(100)$	PD	تراکم لکه	Patch Density
$LSI \geq 1$ ، بدون محدودیت	ندارد	$\frac{0.25E^*}{\sqrt{A}}$	LSI	شاخص شکل سیما	Landscape Shape Index
$0 < LPI \leq 100$	درصد	$\frac{\max(a_{ij})}{A} (100)$	LPI	شاخص بزرگ‌ترین لکه	Largest Patch Index
$ED \geq 0$ ، بدون محدودیت	متر در هکتار	$\frac{E}{A} (10000)$	ED	تراکم حاشیه	Edge Density
$ENN_MN > 0$ ، بدون محدودیت	متر	$\frac{\sum_{j=1}^n h_{ij}}{N}$	ENN_MN	میانگین فاصله نزدیک‌ترین همسایه اقلیدوسی	Mean Euclidean Nearest Neighbor Distance
$0 \leq DIVISION < 1$	نسبت	$\left[1 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{A} \right) \right]^2$	DIVISION	شاخص گسستگی سیما	Landscape Division Index
مساحت کل سیما $MESH \leq$ اندازه سلول	هکتار	$\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}^2}{A}$	MESH	اندازه شبکه تأثیرگذار	Effective Mesh Size
$SHDI \geq 0$ و بدون محدودیت	توضیحات	$-\sum_{i=1}^n (P_i \ln P_i)$	SHDI	شاخص تنوع شانون	Shannon's Diversity Index

جدول ۲. توصیف متغیرهای استفاده‌شده در محاسبه سنج‌های سیمای سرزمین (راهنمای نرم‌افزار Fragstate 4.2، مک‌گاریگال، ۲۰۱۵)

متغیر	توصیف
A	مساحت کل سیما (مترمربع)
a_{ij}	مساحت لکه ij (مترمربع)
h_{ij}	فاصله از لکه ij تا نزدیک‌ترین همسایه از نوع خود بر مبنای فاصله حاشیه لکه‌ها (متر)
N	تعداد لکه‌های سیما
E	طول کل حاشیه سیمای سرزمین که شامل مرز سیمای سرزمین نیز می‌شود (متر)
E^*	طول کل حاشیه سیمای سرزمین که شامل مرز داخلی سیما و برخی یا همه حاشیه زمينه سیما (متر)
P_i	نسبت مساحت سیمای مربوط به انواع لکه

ورود پارامترهای محاسبه شده در بخش تلفات، تبدیل بارش به رواناب و روندیابی، داده‌های ثبت شده بارش و رواناب برای نه رویداد متناظر وارد مدل شده و مدل اجرا شد. در ادامه، پارامتر شماره منحنی و زمان تأخیر با تابع هدف نش-ساتکلیف برای شش رویداد بهینه شد که مقادیر اولیه و میانگین مقادیر بهینه شده شش رویداد این دو پارامتر در جدول ۳ آورده شده است.

میانگین مقادیر پارامترهای واسنجی شده در مرحله اعتبارسنجی وارد مدل شده و مدل برای سه رویداد دیگر اجرا شد. نتایج اجرای مدل در مرحله اعتبارسنجی به صورت هیدروگراف‌های جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در شکل‌های ۳-۵ آورده شده است.

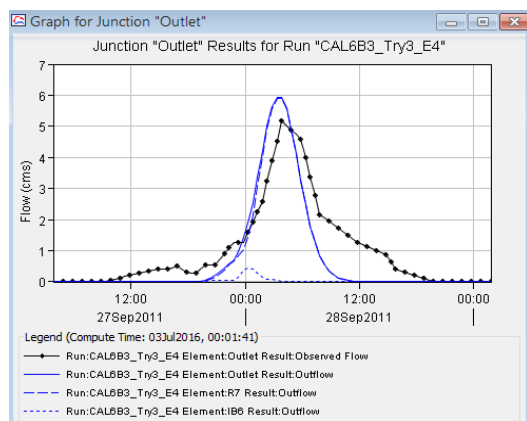
دو متغیر در رابطه رگرسیونی شرکت داشتند، از رگرسیون چندمتغیره برای بررسی ارتباط بین مؤلفه‌های هیدروگراف به‌عنوان متغیر وابسته و سنجه‌های سیمای سرزمین و برخی از خصوصیات زیرحوضه‌ها مانند شماره منحنی، طول آبراهه و شیب به‌عنوان متغیر مستقل استفاده شد. به این منظور، الحاقی آماری^۱ nsRFA در فضای برنامه‌نویسی نرم‌افزار R با قابلیت انتخاب بهترین رابطه خطی از میان تعدادی متغیر مستقل با مجموعه‌ای از ابزارهای آماری و روش‌های رگرسیونی استفاده شد [۴۳ و ۴۴].

نتایج

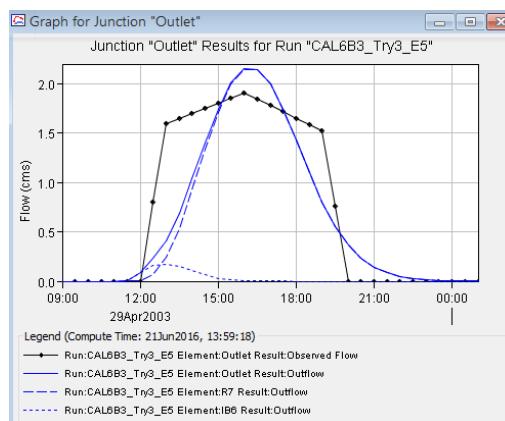
بعد از طراحی مدل حوضه به ۱۲ زیرحوضه و هفت بازه و

جدول ۳. مقادیر اولیه و میانگین مقادیر بهینه شده پارامتر شماره منحنی و زمان تأخیر

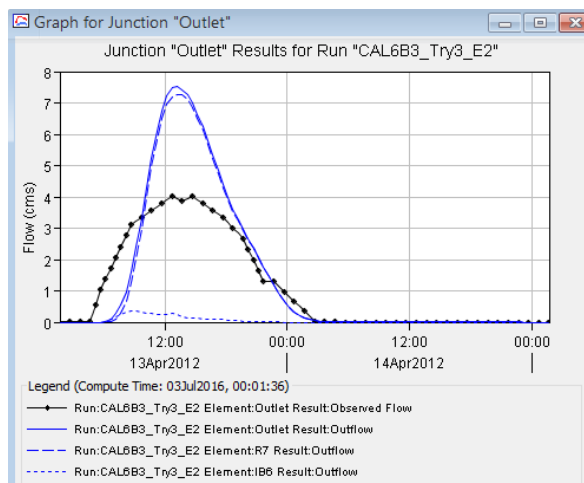
میانگین مقادیر بهینه شده		مقادیر اولیه		واحدهای هیدرولوژیکی
زمان تأخیر (دقیقه)	شماره منحنی	زمان تأخیر (دقیقه)	شماره منحنی	
۳۷/۹۰	۷۹/۲۵	۳۷/۸۸	۷۹/۷۰	B1
۴۴/۱۷	۸۵/۲۸	۴۴/۱۱	۸۵/۸۳	B2
۴۶/۲۲	۷۴/۰۳	۴۶/۱۷	۷۴/۰۰	B3
۱۲۶/۹۲	۷۴/۲۳	۱۲۶/۸۷	۷۴/۶۵	B4
۵۱/۱۱	۷۶/۳۰	۵۱/۰۷	۷۶/۸۳	B5
۹۶/۴۳	۷۸/۳۲	۹۶/۳۹	۷۸/۹۰	B6
۲۴/۴۴	۷۴/۰۴	۲۴/۳۹	۷۴/۰۰	IB1
۴۸/۷۴	۷۴/۱۶	۴۸/۶۹	۷۴/۴۰	IB2
۶۶/۶۳	۷۳/۱۷	۶۶/۵۸	۷۳/۴۴	IB3
۸۸/۷۵	۷۶/۱۲	۸۸/۷۱	۷۶/۲۸	IB4
۷۹/۸۸	۸۴/۳۰	۷۹/۸۵	۸۴/۸۵	IB5
۳۵/۰۷	۸۶/۱۷	۳۵/۰۳	۸۶/۴۳	IB6



شکل ۴. هیدروگراف جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده حوضه آبخیز عموقین مورخ ۱۳۹۰/۰۷/۰۵



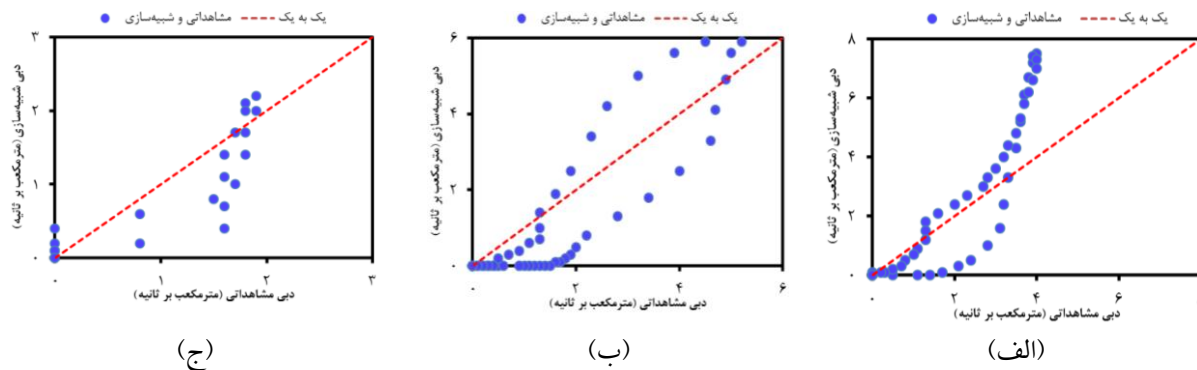
شکل ۳. هیدروگراف جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده حوضه آبخیز عموقین مورخ ۱۳۸۲/۰۲/۰۹



شکل ۵. هیدروگراف جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده حوضه آبخیز عموقین مورخ ۱۳۹۱/۰۱/۲۵

میانگین مربعات خطا استفاده شده است که نتایج آنها در جدول ۴ آورده شده است. پس از تأیید کارایی مدل در شبیه‌سازی جریان سیل در حوضه آبخیز عموقین، مدل HEC-HMS با بارش طرح شش‌ساعته و دوره بازگشت ۲۵ سال اجرا شد که مقادیر مؤلفه‌های هیدروگراف شبیه‌سازی شده بارش طرح در جدول ۵ ارائه شده است.

همچنین، نمودار خط یک‌به‌یک دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده سه رویداد در مرحله اعتبارسنجی تهیه شد که در شکل ۶ ارائه شده است. برای ارزیابی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان در مرحله اعتبارسنجی از شاخص‌های ارزیابی نش-ساتکلیف، میانگین خطای مطلق و ریشه



شکل ۶. نمودار خط یک‌به‌یک دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مرحله اعتبارسنجی رویداد ۱۳۸۲/۰۲/۰۹ (الف)، رویداد ۱۳۹۰/۰۷/۰۵ (ب) و رویداد ۱۳۹۱/۰۱/۲۵ (ج)

جدول ۴. مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل در مرحله اعتبارسنجی

شاخص‌های ارزیابی			رویداد
ریشه میانگین مربعات خطا (مترمکعب بر ثانیه)	میانگین خطای مطلق (مترمکعب بر ثانیه)	نش-ساتکلیف	
۰/۴	۰/۲	۰/۸۰	۱۳۸۲/۰۲/۰۹
۰/۸	۰/۵	۰/۶۹	۱۳۹۰/۰۷/۰۵
۱/۲	۰/۶	۰/۴۰	۱۳۹۱/۰۱/۲۵
۰/۸	۰/۴۳	۰/۶۳	میانگین

جدول ۵. مقادیر مؤلفه‌های هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده بارش طرح در دوره بازگشت ۲۵ سال

زیرحوضه	دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)	حجم سیل (هزار مترمکعب)	زمان تا اوج (ساعت)	زمان پایه (ساعت)
B1	۱۸	۱۶۷/۹	۳/۵	۸
B2	۵۷/۷	۵۷۰/۴	۳/۵	۱۰/۵
B3	۸/۵	۹۳/۹	۴	۸/۵
B4	۸/۲	۱۴۰/۱	۵/۵	۱۳
B5	۲/۷	۳۰/۴	۴	۷/۵
B6	۲/۱	۳۱/۵	۵	۹
IB1	۱/۵	۱۴/۴	۳/۵	۶
IB2	۵/۲	۵۷/۹	۴	۸
IB3	۲/۳	۲۹/۴	۴/۵	۸
IB4	۱/۱	۱۶/۳	۵	۸
IB5	۲/۳	۳۱/۲	۴/۵	۸/۵
IB6	۱/۱	۱۰/۵	۳/۵	۵/۵

جدول ۶. نتایج ضریب همبستگی پیرسون بین مؤلفه‌های هیدروگراف و سنجه‌های سیمای سرزمین

سنجه سیمای سرزمین مؤلفه‌های هیدروگراف	TA	PD	LSI	LPI	ED	EMM_MN	DIVISION	MESH	SHDI
دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)	Pearson Correlation ۰/۷۰*	-۰/۴۲	-۰/۳۳	۰/۰۲	-۰/۴۱	-۰/۴۳	-۰/۰۲	۰/۷۷**	-۰/۰۴
	Sig. (2-tailed) ۰/۰۱	۰/۱۷	۰/۳۰	۰/۹۵	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۹۵	۰/۰۰۳	۰/۹۱
حجم رواناب (هزار مترمکعب)	Pearson Correlation ۰/۷۷**	-۰/۴۲	-۰/۲۶	۰/۰۰۳	-۰/۳۹	-۰/۴۰	۰/۰۰۶	۰/۸۰**	۰/۰۰
	Sig. (2-tailed) ۰/۰۰۳	۰/۱۸	۰/۴۰	۰/۹۹	۰/۲۱	۰/۲۰	۰/۹۷	۰/۰۰۲	۰/۹۹
زمان تا اوج (ساعت)	Pearson Correlation ۰/۲۳	۰/۴۱	۰/۷۱**	-۰/۳۲	۰/۴۲	۰/۶۵*	۰/۴۵	-۰/۱۰	۰/۴۹
	Sig. (2-tailed) ۰/۴۶	۰/۱۸	۰/۰۰۹	۰/۳۱	۰/۱۷	۰/۰۲	۰/۱۴	۰/۷۶	۰/۱۰
زمان پایه (ساعت)	Pearson Correlation ۰/۹۱**	-۰/۱۳	۰/۳۷	-۰/۲۱	-۰/۰۸	۰/۱۹	۰/۲۹	۰/۶۴*	۰/۳۵
	Sig. (2-tailed) ۰/۰۰۰	۰/۶۸	۰/۲۴	۰/۵۲	۰/۸۱	۰/۵۴	۰/۳۵	۰/۰۲	۰/۲۶

* همبستگی معنادار در سطح پنج درصد و ** همبستگی معنادار در سطح یک درصد

متغیرهای مستقل سنجه‌های سیمای سرزمین و برخی خصوصیات زیرحوضه‌ها مانند شماره منحنی، طول آبراهه، شیب و مساحت اراضی کشاورزی و مرتع به‌منظور در نظر داشتن کلیه عوامل مؤثر بر مؤلفه‌های هیدروگراف، در جدول ۷ ارائه شده است.

نتایج مربوط به تحلیل همبستگی مؤلفه‌های هیدروگراف و سنجه‌های سیمای سرزمین با استفاده از ضریب پیرسون در نرم‌افزار SPSS 16.0 در جدول ۶ ارائه شده است.

نتایج مربوط به روابط رگرسیونی متغیرهای وابسته دبی اوج، حجم رواناب، زمان تا اوج و زمان پایه و

جدول ۷. روابط رگرسیونی مؤلفه‌های هیدروگراف با سنجه‌های سیمای سرزمین در حوضه آبخیز عموقین

سطح معناداری	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل شده	روابط	
۰/۰۰۰۰۱	۰/۹۸	۰/۹۸	$Q_{Peak} = 0.044TA + 3.659PD + 0.507S - 0.024CA_RANGE$	۱
۰/۰۰۰۰۴	۰/۹۲	۰/۹۵	$Time\ to\ Peak = 5.794 + 0.084PD + 0.096L + 0.0025CA_AGRI$	۲
۰/۰۰۰۰۵	۰/۷۷	۰/۸۵	$Volume\ Runoff = -1256.006 + 14.103CN + 7.058S + 0.164TA$	۳
۰/۰۰۰۰۰۰۱	۰/۹۹	۰/۹۹	$Base\ Time = 9.748 - 0.068CN + 0.263L + 0.0036MESH + 0.655SHDI + 0.0028CA_AGRI$	۴

مشابه از یک کلاس بر اساس کوتاه‌ترین فاصله حاشیه‌به‌حاشیه، که این فاصله حاشیه‌به‌حاشیه از مراکز سلول مد نظر است، را نشان می‌دهد. بنابراین، هر چه لکه‌های یک کلاس کاربری به هم نزدیک‌تر باشند، پراکنش کپه‌ای است و با افزایش فاصله لکه‌ها (پراکنش گسسته) مقدار این سنج افزایش می‌یابد. مؤلفه زمان پایه نیز، با سنج TA و MESH همبستگی مستقیم دارد. در بررسی رابطه رگرسیونی بین مؤلفه دبی اوج و سنج‌ها (رابطه ۱)، ارتباط مستقیم دبی اوج با سنج TA، PD و شیب مشخص شده است. سنج PD تعداد لکه‌ها را در واحد سطح نشان می‌دهد و افزایش عددی آن نشان از تکه‌تکه‌شدگی سیمای سرزمین است. همچنین، دبی اوج ارتباط معکوس با مساحت کاربری مرتع دارد که با نتایج رضوی‌زاده و همکارانش [۲۲] در خصوص کاهش دبی اوج با افزایش کاربری مرتعی همسوست. با توجه به مقادیر ضرایب متغیرهای مستقل، سهم سنج PD در افزایش دبی اوج نسبت به سایر متغیرها بیشتر بوده که نشان‌دهنده اهمیت یکپارچگی سیماست. رابطه رگرسیونی ۲ نشان‌دهنده ارتباط مستقیم مؤلفه زمان تا اوج هیدروگراف با سنج PD، طول آبراهه و مساحت کاربری کشاورزی است که با نتایج واکر [۵] همسوست. همچنین، ارتباط بین حجم رواناب با شماره منحنی، شیب و مساحت طبق رابطه ۳ مستقیم است. با توجه به مقدار ضریب شماره منحنی در ارتباط آن با حجم رواناب می‌توان به این نتیجه رسید که عامل شماره منحنی، که برازشی از خصوصیات خاک و پوشش گیاهی است، اهمیت زیادی در فرایندهای هیدرولوژیکی دارد و محاسبه دقیق آن امری ضروری است. بررسی رابطه بین مؤلفه زمان پایه هیدروگراف با سنج‌های سیمای سرزمین نشان‌دهنده ارتباط معکوس مؤلفه زمان پایه با شماره منحنی است و ارتباط مستقیم آن با مساحت کاربری کشاورزی، مربوط به عامل مساحت است. همچنین، مؤلفه زمان پایه با طول آبراهه و سنج MESH و SHDI ارتباط مستقیم دارد. سنج SHDI، نشان‌دهنده تنوع و توزیع انواع مختلف لکه‌های کاربری اراضی در سیمای سرزمین بوده و افزایش مقدار آن به معنای حضور تعداد متفاوتی از انواع لکه‌های مختلف در سیماست.

در مجموع، می‌توان گفت که ارتباط بین مؤلفه‌های هیدروگراف و سنج‌های سیمای سرزمین طبق نتایج

در روابط ارائه‌شده، Q_{Peak} ، دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)، TA، سنج مساحت سیمای (هکتار)، LSI، سنج شاخص شکل سیمای، PD، سنج تراکم لکه (تعداد در ۱۰۰ هکتار)، S، شیب زیرحوضه (درصد)، CA_RANGE، مساحت کاربری مرتعی (هکتار)، Time to Peak، زمان تا اوج (ساعت)، L، طول آبراهه (کیلومتر)، CA_AGRI، مساحت کاربری کشاورزی (هکتار)، Volume Runoff، حجم رواناب (هزار مترمکعب)، CN، شماره منحنی، Base Time، زمان پایه (ساعت)، MESH، سنج اندازه شبکه تأثیرگذار (هکتار) و SHDI، سنج شاخص تنوع شانون است.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش بعد از اجرای مدل برای نه رویداد متناظر بارش-رواناب، پارامترهای مدل با شش رویداد بهینه‌شده و میانگین پارامترهای بهینه‌شده برای سه رویداد دیگر در مرحله اعتبارسنجی در نظر گرفته شده است. ارزیابی بصری هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در مرحله اجرا و اعتبارسنجی نشان‌دهنده قابلیت مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان است و با توجه به شاخص‌های ارزیابی محاسبه‌شده در مرحله اعتبارسنجی، که میانگین آنها برای سه رویداد به ترتیب برای نش-ساتکلیف، میانگین خطای مطلق و ریشه میانگین مربعات خطا برابر با ۰/۴۳، ۰/۶۳ و ۰/۸ است، می‌توان نتیجه گرفت که مدل HEC-HMS توانایی شبیه‌سازی هیدروگراف جریان در حوضه آبخیز عموقین را دارد [۲، ۴، ۶ و ۲۳]. با توجه به نتایج همبستگی بین مؤلفه‌های هیدروگراف و سنج‌های سیمای سرزمین ارائه‌شده در جدول ۶، مؤلفه دبی اوج و حجم رواناب با سنج‌های TA و MESH همبستگی مستقیم دارند. سنج MESH میزان جدادگی (شبکه‌ای‌شدن) زمینه سیمای را نمایش می‌دهد. به‌بیانی، در زیرحوضه‌هایی که سیمای آن یکپارچه و دارای یک لکه است، دبی اوج و حجم رواناب زیاد است. همچنین، همبستگی مؤلفه زمان تا اوج با سنج‌های LSI و ENN_MN به صورت مستقیم و معنادار است. سنج LSI، نسبت محیط (طول حاشیه) لکه به حداقل محیط ممکن برای یک لکه با بیشترین تجمع (انباشتگی) را نشان می‌دهد و وقتی که لکه پراکنده‌تر، مرز بی‌نظم‌تر و شکل آن پیچیده‌تر شود، مقادیر آن بدون محدودیت افزایش می‌یابد. همچنین، سنج ENN_MN، متوسط فاصله بین لکه‌های

- [8]. USDA, Natural Resources Conservation Service. Estimation of direct runoff from storm rainfall. Chapter 10. Part 630 Hydrology. National Engineering Handbook. 2004; 79p.
- [9]. Scharffenberger WA, and Fleming MJ. Hydrologic modeling system HEC-HMS User's Manual, USACE. 2010; 1-306.
- [10]. Xiao D, Zhao Y, Sun Z, and Zhang H. Study on the variation of landscape pattern in the west suburbs of Shenyang. Chinese Journal of Applied Ecology. 1990; (1): 75-84.
- [11]. Tlapakova L, Stejskalova D, Karasek P, and Podhrazka J. Landscape metrics as a tool for evaluation landscape structure (case study: Hustopece). European Countryside. 2013; 1: 52-70.
- [12]. Apan AA, Raine SR, and Paterson MS. Mapping and Analysis of Changes in the Riparian Landscape Structure of the Lockyer Valley catchment, Queensland, Australia. Journal of Landscape and Urban Planning. 2002; 59(1): 43-57.
- [13]. McGarigal K, Cushman SA, and Neel E.N. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for categorical maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts. 2002; 691-703.
- [14]. McGarigal K, and Marks B.J. Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Gen.Tech. Rep. PNW-GTR-351. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 1995; 1-122.
- [15]. Botequila Leitao A, Jozeph M, Ahern J, and McGrigal K. Measuring landscapes: A Planner's Handbook. Island Press. 2006; 245.
- [16]. Ali M, Jamalkhan Sh, Aslam I, and Khan Z. Simulation of the impacts of land-use change on surface runoff Lai nullah basin in Islamabad, Pakistan. Landscape and Urban Planning. 2011; 102(4): 271-279.
- [17]. Van Nieuwenhuysen BHJ, Antoine M, Wyseure G, and Govers G. Pattern-process relationships in surface hydrology: hydrological connectivity expressed in landscape metrics. Hydrological Processes. 2011; 25: 3760-3773.
- [18]. Simbay Kabba VT, and Li J. Analysis of land use and land cover change, and their ecological implications in Wuhan, China. Journal of Geography and Geology. 2011; (3)1: 104-118.
- [19]. Giraldo MA. Spatial scale and land use fragmentation in monitoring water processes in the Colombian Andes. Applied Geography. 2012; 34: 395-402.
- مربوط به تحلیل همبستگی و رگرسیونی معنادار بوده است که با نتایج وان نیون هیس و همکارانش [۱۷] و گیرالدو [۱۹] همراستا است. همچنین، با توجه به پیچیدگی فرایند رواناب، در پژوهش حاضر علاوه بر ارتباط مؤلفه‌های هیدروگراف با سنج‌های سیمای سرزمین، ارتباط آن با برخی از خصوصیات حوضه مانند شماره منحنی، طول آبراهه و شیب نیز در نظر گرفته شده است. از طرفی، مقادیر مؤلفه‌های هیدروگراف رفتار متفاوتی با تغییر در سنج‌های سیمای سرزمین داشتند. بر اساس نتایج سنج‌های PD و MESH ارتباط بیشتری با مؤلفه‌های هیدروگراف داشته‌اند. البته، با توجه به اینکه در زیرحوضه‌های آبخیز مطالعه شده تعدادی از کاربری‌های اراضی مساحت بیشتری داشته‌اند، بدیهی است که رفتار مؤلفه‌های هیدروگراف جریان را بیشتر تحت تأثیر قرار داده‌اند.

منابع

- [1]. Raghunath H.M. Hydrology, Principles Analysis Design. New Age International (P) Limited, Publishers. 2006; 463.
- [2]. Sampath DS, Weerakoon SB, and Herath S. HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment with intra-basin diversions—case study of the Deduru Oya river basin, Sri Lanka. ENGINEER. 2015; XLVIII(1): 1-9.
- [3]. Jahangir MH, Sadeghi S, and Soleymani H. Numerical Evaluation of Maximum Flood Discharge Using SCS Method for Land Management on Watersheds of Kan Area. Ecohydrology. 2014; 1(1): 47-57. [Persian]
- [4]. Halwatura D, and Najim MMM. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. Environmental Modelling and Software. 2013; 46: 155-162.
- [5]. Walker JW. A Comparison of storm hydrographs from small urban watersheds with different landuse patterns in Baton Rouge. B.S., University of Southern Mississippi. 2002; 1-67.
- [6]. Legesse Gebre S. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation of upper Blue Nile river basin. Hydrology: Current Research. 2015; 6(2): 1-8.
- [7]. Amiri E, and Roudbari Mousavi MM. Evaluation of IHACRES hydrological model for simulation of daily flow (case study Polrood and Shalmanrood rivers). Ecohydrology. 2017; 3(4): 533-543. [Persian]

- [20]. Kang N, Sakamoto T, Imanishi J, Fukamachi K, Shibata S, and Morimoto Y. Characterizing the historical changes in land use and landscape spatial pattern on the Oguraike floodplain after the meiji period. *Intercultural Understanding*. 2013; 1: 11-16.
- [21]. Mostafazadeh R, Sadoddin A, Bahremand A, Sheikh V, and Nazarnejad H. Assessing hydrological effects of Jafar-Abad watershed management project in Golestan province using HEC-HMS model. *Journal of Watershed Engineering and Management*. 2010; 2(2): 83-93. [Persian]
- [22]. Razavizadeh S, Salajegheh A, Khalighi Sigaroudi Sh, and Jafari M. Effects of land use changes on flood characteristics using HEC-HMS model (Case study: Taleghan watershed). *Range and Watershed Management*. 2013; 66(3): 373-386. [Persian]
- [23]. Vahabzadeh G, Navidifar Y, Habibnejad Rowshan M, and Abghari h. Investigating of the Effect of Land Use Changes on Daily River Discharge Using the HECHMS Model (Case study: Ajerloo Watershed, West Azerbaijan Province). *Water and Soil Science*. 2014; 24(4): 227-236. [Persian]
- [24]. Talebi Amiri Sh, Azari Dehkord F, Sadeghi SH, and Soofbaf S.R. Study on Landscape Degradation in Neka Watershed Using Landscape Metrics. *Environmental Sciences*. 2009; 6(3): 133-144. [Persian]
- [25]. Mirzayi M, Riyahi Bakhtiyari A, Salman Mahini A, and Gholamalifard M. Investigating the Land Cover Changes in Mazandaran Province Using Landscape Ecology's Metrics Between 1984 - 2010. *Applied Ecology*. 2013; 2(4) :37-55. [Persian]
- [26]. Arekhi S, and Fathizad H. Analyzing landscape degradation using landscape ecological metrics, remote sensing and GIS (Case study: Doiraj watershed, Ilam province). *Range and Desert Research*. 2014; 21(3): 466-481. [Persian]
- [27]. Mostafazadeh R, Sadeghi SH, and Sadoddin A. Modeling the effect of land use type and spatial pattern on flow hydrograph variations. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*. 2015; 9(31): 51-58. [Persian]
- [28]. Nohegar A, Jabariyan Amiri B, And Afrakhte R. Land Use Analysis on Guilan Central District Using Landscape Ecology Approach. *Geography and Territorial Spatial Arrangement*. 2015; 5(15): 197-214. [Persian]
- [29]. Rezazadeh MS, Ganjalikhani M, and Zounemat-Kermani M. Comparing the performance of semi-distributed SWAT and lumped HEC-HMS hydrological models in simulating river discharge (Case study: Ab-Bakhsha Watershed). *Ecohydrology*. 2016; 2(4): 467-479. [Persian]
- [30]. USDA, Natural Resources Conservation Service. Urban hydrology for small watersheds. Technical Release 55. 1986; 164p.
- [31]. Wanielista MP. Hydrology Water Quantity and Water Quality Control. University of Central Florida. 1997; 565p.
- [32]. Knebl M.R, Yang Z.L, Hutchison K, and Maidment D.R. 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. *Journal of Environmental Management*. 2005; 75: 325-336.
- [33]. Hawkins R.H. Asymptotic determination of runoff curve number from data. *Irrigation Drainage Engineering*. 1993; 119: 334-345.
- [34]. Chatterjee C, Jha M.ISH.R, Lohani AK, Rakesh Kumar M.ISH, and Singh R. Estimation of SCS curve number for a basin using rainfall-runoff data. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2002; 8(1): 40-49.
- [35]. Mockus V. Estimation of direct runoff from storm rainfall. Chapter 10. *National Engineering Handbook*. 1964; 29p.
- [36]. USDA, Natural Resources Conservation Service. Flood Routing. Chapter 17. Part 630 Hydrology. *National Engineering Handbook*. 2014; 78p.
- [37]. Kotsifakis K.G, Psomas A.G, Feloni E.G, and Baltas E.A. Rainfall - runoff modeling in an experimental watershed in Greece. *International Conference on Environmental Science and Technology Rhodes, Greece*. 2015; 1-5.
- [38]. Alizadeh A. Principle of Applied Hydrology. Ferdowsi University of Mashhad. 946p. [Persian]
- [39]. USDA, Natural Resources Conservation Service. Time of concentration. Chapter 15. Part 630 Hydrology. *National Engineering Handbook*. 2010; 29p.
- [40]. Pilgrim DH, and Cordery I. Rainfall temporal patterns for design floods. *Hydraulic Division*. 1975; 101: 81-95.
- [41]. Ghosh A, Munshi M, Areendran G, and Joshi PK. Pattern space analysis of landscape metrics

- for detecting changes in forests of Himalayan foothills. *Asian Journal of Geoinformatics*. 2012; (12)1: 1-12.
- [42]. Zare Chahouki MA. Data analysis in Ntural resources research using SPSS software. Iranian Students Booking Agency. Tehran. 312p. [Persian]
- [43]. Viglione A, Laio F, Claps P. A comparison of homogeneity tests for regional frequency analysis. *Water Resources Research*. 2007; 43(3): 1–10.
- [44]. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>. 2014.