

## مقدمه

هدف نهایی پیش‌بینی با استفاده از مدل‌های هیدرولوژی، تصمیم‌گیری در مورد مسایل هیدرولوژیکی در زمینه برنامه‌ریزی منابع آب، جلوگیری از وقوع سیلاب، طراحی کانال‌های مهندسی، انتقال آلودگی، پیش‌بینی سیل، ارزیابی اثرهای فاضلاب روی کیفیت آب یا استفاده بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و ... می‌باشد [۲]. شبیه‌سازی و پیش‌بینی سیلاب معمولاً مبتنی بر مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی تک واقعه‌ای بارش-رواناب است که بر حوضه‌های آبریز واقع می‌شود. بدین ترتیب، در این نوع مدل‌ها، جریان آب رودخانه ناشی از وقایع اقلیمی بین دو سیلاب شبیه‌سازی نمی‌شود. دقت نتایج حاصل از این نوع مدل‌ها بستگی به دقت شبیه‌سازی شرایط اولیه رطوبت حوضه آبخیز داشته و در نتیجه، ابهام در شبیه‌سازی‌ها وجود دارد. در نوع دیگر مدل‌های بارش-رواناب (معروف به مدل‌های پیوسته)، جریان آب با استفاده از رخدادهای اقلیمی (بارش و تبخیر و تعرق) که به‌صورت پیوسته زمانی در طولانی مدت (شامل زمان‌های خشک و تر) واقع می‌شود، شبیه‌سازی شده که عاری از ابهام مذکور می‌باشد. نیاز به ارزیابی کلیت وقایع هیدرولوژیکی (از جمله سیلاب) ناشی از وقایع بارش (دوره تر) و بین آن‌ها (دوره خشک) دلیل عمده برتری این نوع مدل‌ها می‌باشد. در این رابطه، تاکنون مدل‌های متنوعی برای این منظور ابداع و ارایه شده که از خواص و ویژگی‌های متفاوتی جهت تولید رواناب برخوردارند. مهم‌ترین مشکل استفاده از آنان را می‌توان در معادلات تجربی به‌کار گرفته برای برآورد مولفه تبخیر و تعرق واقعی، به‌ویژه در زمان‌های خشک (بدون بارش) دانست. شریفی [۱۲] با به‌کار گرفتن یک نمونه از مدل‌های پیوسته بارش-رواناب با اصلاح معادلات، اقدام به برآورد سیلاب‌ها با استفاده از شناخت دقیق‌تر ویژگی‌های حوضه آبریز نمود. نتیجه این اصلاح، بهبود قابل توجه مدل در شبیه‌سازی داده‌ها از نظر ویژگی‌های آماری (آماره‌ها) و قابلیت کاربرد آن در برآورد اوج سیلاب‌ها بود.

رضائیان‌زاده و همکاران [۱۱] از مدل مفهومی پیوسته SMA و همچنین شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی جریان روزانه حوضه آبریز خسرو شیرین استفاده کردند. آنها نتیجه گرفتند که با بهینه کردن پارامترها به روش تابع انتقال حلقوی تانژانت در روش شبکه عصبی مصنوعی، نتایج بهتری را نسبت به روش مدل توزیعی SMA به‌دست می‌دهد. ولی شبکه عصبی مصنوعی نسبت به مدل توزیعی از لحاظ تصمیم گرفتن در مورد پارامترهای یک حوضه آبخیز و بررسی

شبیه‌سازی جریان روزانه حوضه آبخیز نکارود  
با استفاده از مدل پیوسته محاسبه رطوبت خاکمجتبی خوش‌روش<sup>۱\*</sup> و رضا نوروز<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۸/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۲/۰۴

## چکیده

کاربرد مدل‌های پیوسته هیدرولوژیکی و همچنین توسعه روش‌های واسنجی آن با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی به‌طور چشمگیری در حال گسترش می‌باشد. هدف از این پژوهش، واسنجی و اعتبارسنجی مدل پیوسته محاسبه رطوبت خاک (SMA) و همچنین شبیه‌سازی جریان به صورت پیوسته در حوضه نکارود می‌باشد. در این پژوهش ابتدا متغیرهای بارش و دما وارد مدل شده، سپس مدل برای دوره‌های آماری مختلف واسنجی و پارامترهای آن محاسبه شد، همچنین پارامترهای تخمینی موردنیاز، در محیط GIS تجزیه و تحلیل و در نهایت برای دوره‌های آماری مختلف، اعتبارسنجی و صحت و دقت آن برآورد شد. هیدروگراف‌های ایجاد شده از سناریوهای پارامترهای مدل تنظیم یافته، با هیدروگراف مدل مشاهداتی ایستگاه گلورد مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی سالانه نشان داد که ضریب تبیین دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی به ترتیب برابر ۰/۸۰ و ۰/۷۵ می‌باشد. همچنین برای دوره اعتبارسنجی مدل، تابع هدف AEPM (۱۰/۱۷) تطبیق بهتری را نسبت به دوره واسنجی داشت (۱۸/۲۶). با انجام شبیه‌سازی جریان رودخانه و با استفاده از رخدادهای اقلیمی که به‌صورت پیوسته زمانی در طولانی مدت واقع می‌شود، نتایج دبی روزانه برای حوضه آبخیز نکارود در حد قابل قبول به‌دست آمد. با کاربرد این مدل در برآورد جریان رودخانه، مطالعه تغییر اقلیم، تغییر در کاربری اراضی و در نتیجه مدیریت هرچه بهتر منابع آب میسر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حساسیت، اقلیم، جریان پیوسته، GIS، مدل بارش - رواناب، نکارود

۱. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، نویسنده مسئول: Email: Khoshravesh\_m24@yahoo.com

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

تأثیرپذیری هر یک از عوامل، دارای محدودیت بیشتری می‌باشد. فلمینگ و وینسنت [۵] سه مدل سالیانه، نیمه سالیانه و فصلی را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که مدل فصلی و نیمه سالیانه در مقایسه با مدل سالیانه، شبیه‌سازی دقیق‌تری را ارائه می‌دهد، به طوری که مدل سالیانه اساساً در شرایط «تر» معتبر بوده و مقدار پیش‌بینی بیشتری از جریان در شرایط «خشک» می‌دهد. کاندرلیک و سیمونویک [۴] جریان رودخانه را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی پیوسته توزیعی، HRCDDM شبیه‌سازی کردند. هدف آنها تعیین روشی بود که با آن، ورودی بارش و عدم قطعیت پارامترهای مدل روی ویژگی شبیه‌سازی جریان و عدم قطعیت پیش‌بینی مدل‌های هیدرولوژیکی تأثیر می‌گذارد. نتایج نشان داد که اگر مدل HCDHM با داده‌های ساعتی شبیه‌سازی شود، جریان رودخانه ساعتی مشاهده شده در خروجی، تطابق خوبی با دبی مشاهده‌ای خواهد داشت.

قلی‌نژاد [۷] در تحقیقی با تأکید بر تأثیر تغییر اقلیم روی فراوانی سیل، روش محاسبه رطوبت خاک SMA را برای حوزه آبخیز نکارود برای بررسی فراوانی وقوع سیلاب در دوره‌های خشک و تر بررسی کرد. وی با استفاده از واسنجی دستی و خودکار سعی در برآورد میزان جریان روزانه رودخانه پرداخت که تقریباً دبی‌های مشاهده شده تطابق خوبی با جریان شبیه‌سازی شده داشت.

غفوری و همکاران [۶] مدل HEC-HMS را به همراه مدل محاسبه تلفات SMA برای شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه کارون در محل ایستگاه هیدرومتری پل شالو مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد تطابق مناسب ( $R^2=0.82$ ) بین داده‌های جریان مشاهده‌ای و مدل‌سازی شده در دوره اعتبارسنجی وجود دارد. همچنین درصد خطای حجم کل، ضریب راندمان Nash-Sutcliffe و جذر میانگین مربعات خطای مدل به ترتیب برابر با ۱۱/۳ درصد، ۰/۸۲ و ۱۵۱ به دست آمد.

سینگ و جین [۱۳] مدل SMA را برای جریان رودخانه در حوزه رودخانه وامساردا در کشور هندوستان شبیه‌سازی کردند. در این پژوهش دوره واسنجی مدل از سال ۱۹۸۴ تا ۱۹۸۹ و دوره اعتبارسنجی مدل از ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۳ انتخاب شدند. نتایج واسنجی مدل نشان داد که تطابق خوبی بین دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی با ضریب اطمینان ۰/۷۱ و ضریب نش-ساتکلیف ۰/۷۰۱ وجود دارد. همچنین نتایج اعتبارسنجی مدل نشان داد که بین دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی با ضریب اطمینان ۰/۷۱ و ضریب نش-ساتکلیف ۰/۷۰۱ همبستگی بالایی وجود دارد.

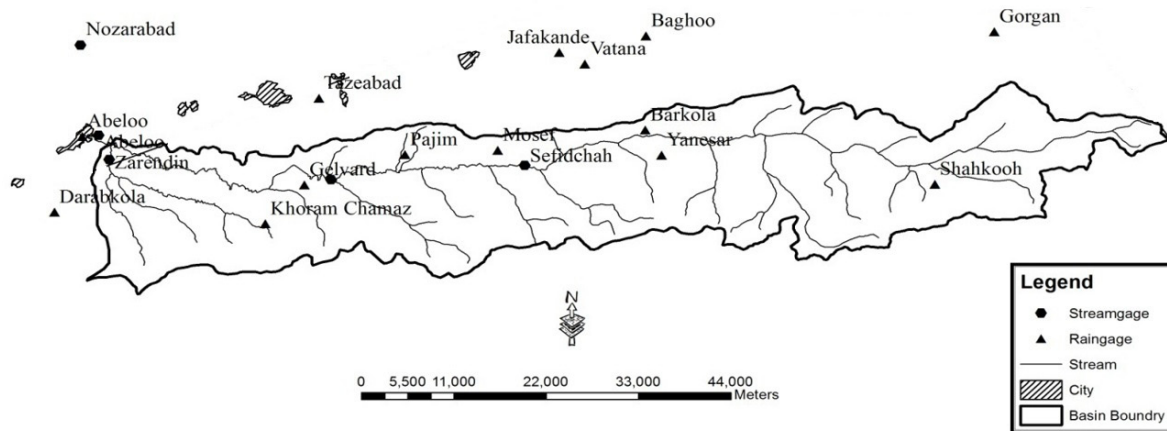
گروک و همکاران [۸] اثرات بالقوه جنگل‌زدایی را روی پاسخ‌های هیدرولوژیکی با استفاده از مدل دینامیکی پیوسته بارش-رواناب IHACRES بررسی کردند. هدف این مطالعه، ارائه یک روش هیدرولوژیکی ساده برای پیش‌بینی پاسخ‌های هیدرولوژیکی نسبت به تغییرات کاربری و پیش‌بینی جریان رودخانه در حوضه‌های فاقد آمار با استفاده از آنالیز منطقه‌ای ساده بود. نتایج آنها نشان می‌دهد که اجرای مدل هنگامی که پارامترهای کالیبره شده از حوضه‌های بزرگ

برای منطقه‌بندی استفاده شدند، نتیجه بهتری حاصل می‌شود. از همه مهم‌تر، این روش قادر به پیش‌بینی الگوی نسبی جریان فصلی و سالانه می‌باشد. خزایی و همکاران [۹] به بررسی اثر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه با استفاده از مدل پیوسته بارش-رواناب ARNO پرداختند. آنها با استفاده از مدل ARNO که مدل مفهومی نیمه توزیعی بارش-رواناب، هشت پارامتره بوده که با استفاده از یک دوره مشاهداتی برآورد و سپس اعتبارسنجی می‌شود، جریان آب روزانه را در یکی از زیر حوضه‌های کارون شبیه‌سازی کردند. در این مطالعه، با استفاده از یک رهیافت ویژه، نسبت به آماده‌سازی متغیرهای مورد نیاز مدل از قبیل جریان رواناب، بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه اقدام شده است. نتایج، حاکی از موفقیت این رهیافت برای شبیه‌سازی جریان روزانه با بکارگیری این مدل بود. هدف از اجرای این پژوهش، تخمین پارامترهای مدل SMA و همچنین شبیه‌سازی جریان رودخانه جهت تعیین دبی روزانه در حوزه آبخیز نکارود با استفاده از مدل پیوسته SMA می‌باشد. جریان آب با استفاده از رخدادهای اقلیمی (بارش، دما، تبخیر و تعرق و ...) که به صورت پیوسته زمانی در طولانی مدت (شامل زمان‌های خشک و تر) واقع می‌شود، شبیه‌سازی خواهد شد.

### مواد و روش‌ها

رودخانه نکا که مهروان رود یا میران رود نیز نامیده می‌شود، از ارتفاع ۳۴۰۰ متری شاه‌کوه که در جنوب شرقی شهرستان گرگان قرار دارد سرچشمه گرفته و پس از طی مسافت نزدیک به ۱۷۵ کیلومتر در محل صیدگاه گهرباران به دریای خزر می‌ریزد. قسمت اعظم مسیر رودخانه در رشته کوه البرز قرار گرفته و جهت آن تقریباً شرقی-غربی و به موازات خط ساحلی دریای خزر می‌باشد. رودخانه نکا پس از خروج از قسمت کوهستانی مسیر پرپیچ و خمی را به طول تقریبی ۴۰ کیلومتر در آبرفت‌های دشت نکا طی نموده و به دریای خزر می‌ریزد. پوشش گیاهی بالادست حوضه، اغلب مرتعی می‌باشد. پوشش جنگلی غالباً در میانه حوضه قرار دارد و در قسمت پایین دست، کاربری‌های اراضی عمدتاً کشاورزی و مسکونی می‌باشد. سازند زمین‌شناسی حوضه غالباً از لایه نازک آهکی تشکیل شده است. شکل ۱، حوضه نکا و ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری را نشان می‌دهد.

انتخاب بهترین مدل بستگی به مساله مورد بررسی دارد. به عنوان مثال برای حوضه‌های فاقد آمار، مدل‌هایی که دارای پارامترهای زیاد هستند، مناسب نمی‌باشند. بدیهی است که در این حوضه‌ها به واسطه کمبود داده‌های رواناب و نبود روش‌های مناسب برای ارزیابی پارامترها، تخمین پارامترها با استفاده از اطلاعات خصوصیات فیزیکی حوضه‌ها، بسیار مشکل می‌باشد. مدل HEC-HMS برای تجزیه و تحلیل و تبدیل بارندگی به رواناب استفاده می‌شود. این برنامه برای توصیف هیدروگراف جریان رخدادهای تاریخی و یا فرضی در مکان‌های مختلف حوضه آبریز کاربرد دارد [۱]. این برنامه



شکل ۱: موقعیت ایستگاه‌های حوضه نکارود

$$MAE = \left[ \frac{1}{n} \sum |Q_o - Q_s| \right] \quad (2)$$

که در آن:

$Q_o$ : دبی مشاهده شده

$Q_s$ : دبی شبیه‌سازی شده می‌باشد.

- میانگین خطای مطلق مقادیر اوج (AEPM)

$$AEPM = \left[ \frac{1}{n} \sum |(Q_o - Q_s) / Q_o| \right] \times 100 \quad (3)$$

- خطای حجم رواناب (EV)

$$EV = \left[ (V_o - V_s) / V_o \right] \times 100 \quad (4)$$

که در آن:

$V_o$ : حجم رواناب مشاهده شده

$V_s$ : حجم رواناب شبیه‌سازی شده می‌باشد.

- خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\left[ \sum (Q_o - Q_s)^2 / n \right]} \quad (5)$$

## نتایج

اولین مرحله در مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه توسط مدل پیوسته SMA، تقسیم حوضه به زیر حوضه‌ها می‌باشد. از این رو جهت اجرای مدل، لایه‌های اطلاعاتی شرح داده شده در قسمت‌های قبل به مدل معرفی و حوضه به ۱۱ زیرحوضه تقسیم‌بندی شد. تعداد این واحدها در هر زیرحوضه با استفاده از HEC-GEO HMS و DEM تصاویر ماهواره‌ای IRS تهیه شد. انتخاب هر زیرحوضه برحسب تنوع خاک، پوشش گیاهی و توپوگرافی تقسیم‌بندی شده است. این مدل دارای ۱۳ پارامتر برای ماژول SMA می‌باشد که هر ۱۳ پارامتر برای آنالیز حساسیت به‌کار رفتند و همچنین یک پارامتر آب پایه که شامل دبی آب پایه اولیه می‌باشد. از جمله پارامترهای به‌کار رفته در مدل که قبل از انجام عمل و واسنجی با توجه به گزارش‌های موجود و یا روابط تجربی تدقیق شدند، شامل ذخیره پوشش گیاهی، ذخیره سطحی، نفوذ ماکزیمم، سطح نفوذ ناپذیری، ذخیره خاک، ذخیره کششی، نفوذ عمقی خاک، ذخیره آب زیرزمینی مخزن لایه ۱، نفوذ عمقی آب زیرزمینی مخزن لایه ۱، ضریب آب

قادر است با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی، مشخصات حوضه و بارش، هیدروگراف سیلاب مقطع خروجی حوضه را محاسبه کند. این مدل با ترکیب سه زبان برنامه‌نویسی C و C++ و فورترن نوشته شده و محیط گرافیکی کاربر پسندی دارد. در این برنامه با استفاده از یک سری روابط ساده مربوط به برآورد تلفات بالقوه حوضه و تعیین هیدروگراف واحد، از داده‌های بارندگی جهت تعیین رواناب حاصله استفاده می‌شود.

مدل SMA در HEC-HMS نسخه 3.4 بر اساس مدل بارندگی Leavesley [10] که در سال ۱۹۹۸ جزئیات آن توسط بنت تشریح شد، طراحی شده است. این مدل حرکت آب و ذخیره آن را در گیاهان، سطح خاک و عمق خاک و لایه‌های زیرزمینی شبیه‌سازی کرده و با داشتن مقدار بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل (ET)، مدل جریان سطحی و جریان آب زیرزمینی، تلفات ناشی از تبخیر و تعرق پتانسیل (ET) و نفوذ را در کل حوضه آبخیز محاسبه می‌کند. مدل SMA شامل یک سری لایه‌های ذخیره‌کننده و جریان می‌باشد.

برای واسنجی مدل، دو هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با هم مقایسه شده و جهت انطباق، یک سری از خصوصیات و پارامترهای ورودی مدل اصلاح می‌شود. معیار برازش نتایج مدل و داده‌های مشاهده‌ای، یک تابع هدف خطی است. این عمل در سیستم مدل هیدرولوژیکی تحت عنوان اعتبارسنجی و توسط پنج تابع هدف به‌صورت زیر انجام می‌گیرد. در هر روش با استفاده از یک الگوریتم خاص، میزان اختلاف بین پارامتر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، تعیین می‌شود. توضیحات کامل هر یک از توابع هدف در زیر آمده است.

- انحراف معیار (SD)

$$SD = \sqrt{\left[ \frac{1}{n} \sum (Q - \bar{Q})^2 \right]} \quad (1)$$

که در آن:

$Q$ : جریان شبیه‌سازی شده

$\bar{Q}$ : میانگین جریان رودخانه می‌باشد.

- خطای مطلق میانگین (MAE)

زیرزمینی مخزن لایه ۱، ذخیره آب زیرزمینی مخزن لایه ۲، نفوذ عمقی آب زیرزمینی مخزن لایه ۲ (GW<sub>2</sub> Percolation)، ضریب ذخیره مخزن آب زیرزمینی ۱ (GW<sub>1</sub> Storage)، ذخیره کشتی (Tension Storage) و ضریب ذخیره مخزن آب زیرزمینی ۱ (GW<sub>2</sub> Storage) حساسیت بیشتری دارند. پارامترهای آب‌های زیرزمینی SMA در ترکیب با پارامترهای آب پایه برای شبیه‌سازی جریان کم آب و همچنین برای برازش نکوئی کلی اهمیت زیادی دارند. فلمینگ و وینسنت [۵] آنالیز حساسیت مشابهی را با استفاده از مدل پیوسته HEC-HMS در کنتاکی و تنسی آمریکا انجام دادند. آنها محاسبه کردند که میزان نفوذ ماکزیمم، عمق ذخیره خاک و عمق ناحیه کشتی خاک، بیشترین تغییرات را در جریان مدل‌سازی هنگام مقایسه داشتند. تحقیق دیگری توسط کاندریک و سیمونیک [۴] در اونتاریو کانادا انجام شد که پارامترهای ضریب ذخیره آب‌های زیرزمینی و میزان نفوذ عمقی خاک و میزان ذخیره آب‌های زیر زمینی نسبت به تابع هدف مورد نظر، بیشترین تغییرات را هنگام مقایسه داشتند.

در پژوهش حاضر، میزان حساسیت در لایه دوم آب‌های زیرزمینی بسیار بالا می‌باشد. این نشان می‌دهد که میزان نگهداری آب در این قسمت از لایه بیشتر از لایه‌های دیگر سیستم می‌باشد. همچنین پارامتر عمق ناحیه کشتی خاک همانند دو مطالعه قبل دارای حساسیت بالایی نسبت به پارامترهای دیگر می‌باشد (جدول ۱).

جدول ۱: نتایج آنالیز حساسیت مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در ایستگاه گلورد

+20					-20					درجه حساسیت
SD	AEPM	RMSE	EV	MAE	SD	AEPM	RMSE	EV	MAE	تابع هدف پارامتر
۴/۰۹	۲۷/۳۵	۲/۶۳	-۲۰/۷۸	۰/۴۹	۴/۱۶	۲۹/۹۴	۲/۶۵	-۱۷/۴۲	۰/۴۱	Cs
۳/۹۰	۲۴/۵۸	۲/۵۰	-۲۰/۴۰	۰/۴۸	۴/۴۱	۳۹/۲۵	۲/۸۶	-۱۹/۰۶	۰/۴۵	Ss
۴/۱۵	۲۸/۲۸	۲/۶۵	-۲۲/۸۰	۰/۵۴	۴/۰۴	۲۷/۲۴	۲/۵۸	-۱۵/۷۹	۰/۳۷	im
۳/۸۷	۲۵/۰۷	۲/۴۹	-۲۰/۴۸	۰/۴۹	۴/۴۱	۳۹/۲۵	۲/۸۶	-۱۹/۰۶	۰/۴۵	Mi
۴/۵۱	۳۸/۵۴	۲/۵۰	-۲۰/۹۸	۰/۴۸	۴/۳۸	۳۹/۲۴	۲/۹۵	-۲۰/۱۱	۰/۴۱	Us
۳/۹۵	۲۸/۴۰	۲/۵۵	-۱۲/۵۴	۰/۳۰	۴/۴۸	۳۱/۶۸	۲/۸۹	-۳۵/۰۹	۰/۸۳	Ts
۴/۵۰	۴۰/۱۴	۲/۹۶	-۲۳/۳۹	۰/۵۵	۴/۱۰	۲۸/۸۱	۲/۶۲	-۱۷/۰۷	۰/۴۰	Sp
۴/۵۷	۴۰/۵۴	۳/۰۳	-۲۵/۳۱	۰/۶۰	۳/۹۹	۲۷/۲۵	۲/۵۴	-۱۴/۹۹	۰/۳۶	gw1s
۴/۴۳	۳۹/۱۱	۲/۹۱	-۲۲/۰۶	۰/۵۲	۴/۲۲	۳۰/۳۲	۲/۷۲	-۱۹/۵۸	۰/۴۶	gw1p
۴/۴۳	۳۹/۳۵	۲/۹۱	-۲۱/۹۱	۰/۵۲	۴/۱۷	۲۸/۶۱	۲/۶۸	-۱۹/۴۷	۰/۴۶	gw1c
۴/۵۷	۴۰/۰۶	۳/۰۱	-۲۹/۷۱	۰/۷۰	۴/۰۰	۲۷/۵۸	۲/۵۸	-۱۰/۱۱	۰/۲۴	gw2s
۴/۳۸	۳۹/۶۷	۲/۹۰	-۱۴/۲۴	۰/۳۴	۴/۱۹	۲۷/۸۱	۲/۶۷	-۲۵/۳۸	۰/۶۰	gw2p
۴/۴۰	۴۰/۱۴	۲/۹۰	-۱۵/۱۱	۰/۳۶	۴/۲۵	۲۷/۵۰	۲/۷۳	-۲۸/۹۹	۰/۶۹	gw2c
۴/۰۲	۲۸/۲۵	۲/۱۲	-۱۹/۵۱	۰/۴۸	۴/۲۵	۳۰/۳۲	۲/۵۴	-۱۸/۵۰	۰/۴۳	gw1initial

Cs: ذخیره پوشش گیاهی، Ss: ذخیره سطحی، Mi: نفوذ ماکزیمم، Im: سطح نفوذناپذیری، Us: ذخیره خاک، Ts: ذخیره کشتی، Sp: نفوذ عمقی خاک، GW<sub>1</sub>s: ذخیره آب زیرزمینی مخزن ۱، GW<sub>1</sub>p: نفوذ عمقی آب زیرزمینی مخزن ۱، GW<sub>1</sub>c: ضریب آب زیرزمینی مخزن ۱، GW<sub>2</sub>s: ذخیره آب زیرزمینی مخزن ۲، GW<sub>2</sub>p: نفوذ عمقی آب زیرزمینی مخزن ۲، GW<sub>2</sub>c: ضریب آب زیرزمینی مخزن ۲، GW<sub>1</sub> initial: دبی آب پایه اولیه، MAE: ضریب خطای مطلق میانگین، EV: خطای حجمی، RMSE: خطای میانگین ریشه مربعات، AEPM: میانگین خطای مطلق مقادیر اوج، SD: انحراف معیار

براساس جدول ۱ برای پارامتر نفوذ عمقی با توجه به معیارهای  $AEPM$ ،  $RMSE$ ،  $EV$ ،  $MAE$  به ترتیب ۰/۴۵، ۱۹/۰۶، ۲/۸۶ و ۳۹/۲۵ در تغییرات ۲۰- به دست آمد. همچنین برای همین پارامتر با توجه به معیارهای  $AEPM$ ،  $RMSE$ ،  $EV$ ،  $MAE$  به ترتیب ۰/۴۹، ۲۰/۴۸، ۲/۲۹ و ۲۵/۰۷ در تغییرات ۲۰+ به دست آمد. برای پارامتر نفوذ عمقی با توجه به معیارهای  $AEPM$ ،  $RMSE$ ،  $EV$ ،  $MAE$  به ترتیب ۰/۴۵، ۱۹/۰۶، ۲/۸۶ و ۳۹/۲۵ در تغییرات ۲۰- به دست آمد. نفوذ عمقی مخزن آب زیرزمینی ۲ که دومین پارامتر حساس در شبیه‌سازی مدل به شمار می‌رود با توجه به معیارهای  $AEPM$ ،  $RMSE$ ،  $EV$ ،  $MAE$  به ترتیب ۰/۶۰، ۲۵/۳۸، ۲/۶۷۲ و ۳۷/۸۱ در تغییرات ۲۰- به دست آمد. همچنین برای همین پارامتر با توجه به معیارهای  $AEPM$ ،  $RMSE$ ،  $EV$ ،  $MAE$  به ترتیب ۰/۳۴، ۱۴/۲۴، ۲/۹۰ و ۳۹/۶۷ در تغییرات ۲۰+ به دست آمد. دوره ۵ ساله (اکتبر ۲۰۰۵ تا سپتامبر ۲۰۱۰) برای واسنجی و دوره ۵ ساله (اکتبر ۲۰۱۰ تا سپتامبر ۲۰۱۵) برای اعتبارسنجی مدل انتخاب شد. نتایج ابتدایی واسنجی مدل نشان داد که جریان رودخانه‌ها در بهار و زمستان، بیشتر از جریان شبیه‌سازی شده و در تابستان و پاییز، کمتر از آن برآورد شده است. علت این امر به خاطر رطوبت پیشین خاک می‌باشد که در فصل بهار و زمستان، رطوبت خاک در مخزن آب زیرزمینی ۱ بیشتر از مخزن آب زیرزمینی فصل تابستان و پاییز بوده است. این خطا احتمالاً به خاطر تفاوت بین پاسنگویی بارش و رواناب غیرخطی در حوضه و ساختار خطی مدل SMA می‌باشد. نرم افزار HEC-HMS 3.4 قابلیت استفاده از ماژول برف را دارا می‌باشد که به کاربر اجازه استفاده از پارامترهای برف را برای شبیه‌سازی مدل می‌دهد. در مرحله واسنجی تفاوت زیادی بین دبی اوج مشاهده شده و شبیه‌سازی شده وجود ندارد. برای دستیابی به این مهم، نفوذ ماکزیمم در مرحله واسنجی مدل به منظور تطابق

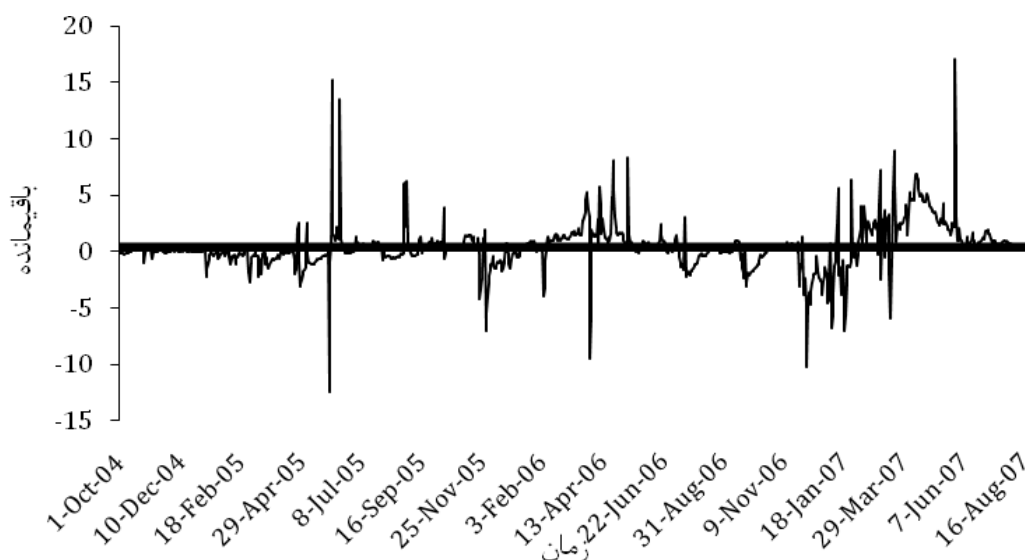
میان جریان اوج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی تنظیم یافت که به نظر می‌رسد این پارامتر سهم مهمی در جریان‌های اوج دارد. سعی شده است که این تطابق با وقایع سیلاب‌های بزرگ صورت بگیرد. سایر پارامترها نظیر نفوذ عمقی خاک و همچنین ذخیره کششی نیز برای تطابق مناسب بین جریان اوج شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای تنظیم یافتند. اعتبارسنجی مدل در این پژوهش به منظور تعیین تأثیرپذیری روش‌های واسنجی و پارامتره کردن استفاده شده است.

جدول ۲ سنجه‌های آماری دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. با اجرای مدل در مرحله واسنجی نسبت به مرحله اول (بدون بهینه کردن پارامترها) نشان داد که معیارهای برازش برای تطبیق یافتن مدل شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای کاهش یافتند. همچنین برای دوره اعتبارسنجی مدل، تابع هدف  $AEPM$  (۱۰/۱۷) تطبیق بهتری را نسبت به دوره واسنجی داشت (۱۸/۲۶). ضریب همبستگی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر ۰/۸۶ و ۰/۷۵ به دست آمد که همبستگی خوبی را میان دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای نشان می‌دهد.

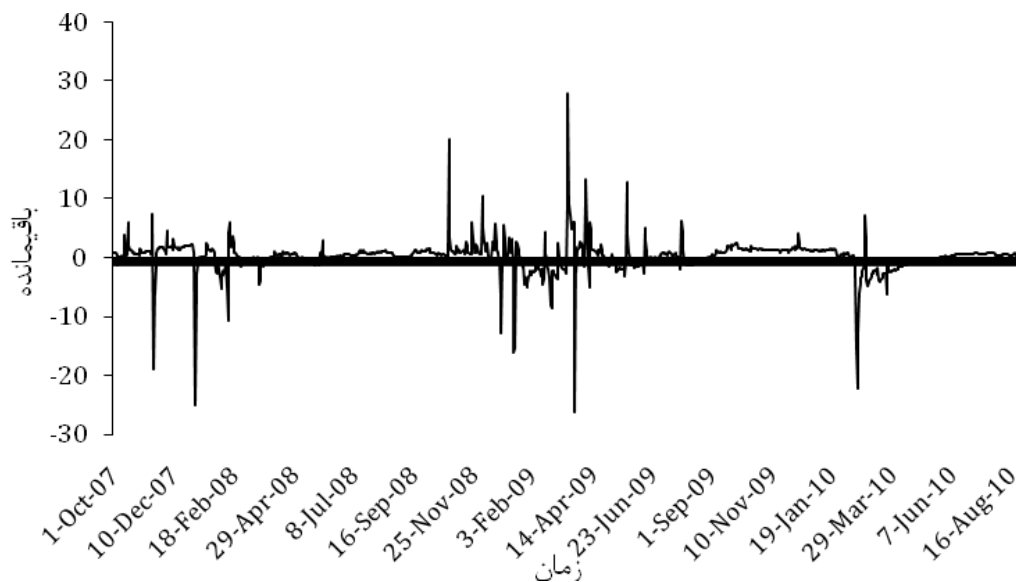
#### جدول ۲: نتایج تخمین‌های آماری برای دوره واسنجی

اعتبارسنجی و اعتبارسنجی						
اندازه‌گیری	MAE	EV	RMSE	AEPM	sd	$R^2$
دوره واسنجی	۰/۱۵	-۳/۴۵	۱/۹۸	۱۸/۲۶	۳/۱۳	۰/۸۰
دوره اعتبارسنجی	۰/۲۲	۵/۱۴	۲/۴۷	۱۰/۱۷	۴/۰۲	۰/۷۵

شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب باقیمانده جریان دبی برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی را در هر گام زمانی نشان می‌دهد. خطوط عمودی برای نشان دادن شروع و پایان تابع هدف می‌باشد. مقدار باقیمانده‌ها،



شکل ۲: باقیمانده جریان دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی برای دوره واسنجی



شکل ۳: باقیمانده جریان دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی برای دوره اعتبارسنجی

ماکزیمم برای مخزن ۱ و ۲ با استفاده از منحنی فروکش سیل به دست آمد. در سایر پارامترها که نیاز به نقشه خاک برای محاسبه پارامترهای SMS مدل بود، به دلیل نبود نقشه‌های کافی و ریز مقیاس در حوضه، از طریق روش واسنجی و آنالیز حساسیت، اقدام به برآورد پارامترها شد [۷].

نتایج آنالیز حساسیت مدل نشان داد که پارامترهای نفوذ ماکزیمم (Mi) نفوذ عمقی مخزن آب زیرزمینی ۲ (GW<sub>2</sub> Percolation)، ضریب ذخیره مخزن آب زیرزمینی ۱ (GW<sub>1</sub> Storage)، ذخیره کششی (Tension Storage) و ضریب ذخیره مخزن آب زیرزمینی ۱ (GW<sub>2</sub> Storage) حساسیت بیشتری دارند. نتایج آنالیز حساسیت مدل برای پارامتر نفوذ عمقی مخزن آب زیرزمینی ۱ با نتایج سینگ و جین [۱۳] همخوانی دارد. پارامترهای آب زیرزمینی SMA در ترکیب با پارامترهای آب پایه برای شبیه‌سازی جریان کم آب و همچنین برای برازش نکوئی کلی اهمیت زیادی دارند. در شبیه‌سازی اولیه، که به طور سالانه انجام شد، مدل در دوره های خشک مقدار جریان کمتری را نسبت به دبی مشاهداتی مدل‌سازی کرد که علت این امر به خاطر رطوبت پیشین خاک می باشد که در فصل بهار و زمستان، رطوبت خاک در مخزن آب زیرزمینی ۱، بیشتر از مخزن آب زیرزمینی فصل تابستان و پاییز می باشد. نتایج این پژوهش با مطالعه کاندرلیک و سیمونویک [۸] همخوانی دارد. پارامترهای نفوذ ماکزیمم و همچنین عمق ذخیره کششی خاک جهت برآورد بهتر مقدار دبی اوج در مدل SMA تنظیم شدند که با نتایج کار فلمینگ و وینسنت [۵] و همچنین کاندرلیک و سیمونویک [۴] همخوانی دارد.

کیفیت تخمین پارامتر را نشان می دهد. باقیمانده‌ها نشان می دهند که آیا انحرافی بین جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده وجود دارد یا خیر. همان‌طوری که شکل ۳ نشان می دهد، پارامترهای مربوط به لایه‌های ذخیره آب زیرزمینی ۱ و ۲ برای مرحله اعتبارسنجی با توجه به اختلاف کم در دوره‌های خشک جریان، به خوبی تخمین زده شدند.

### بحث و نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، استفاده از یک مدل پیوسته بارش-رواناب به منظور شبیه‌سازی رواناب بود. عمده مدل‌های تبدیل بارش به رواناب برای تولید سیلاب مبتنی بر شبیه‌سازی حادثه سیلابی ناشی از یک واقعه رگبار می باشند. عیب عمده این مدل‌ها عدم امکان کمیت بخشیدن به شرایط اولیه رطوبت خاک برای شبیه‌سازی رخداد مورد نظر به خاطر حساسیت مدل به آن شرایط می باشد. ابهام ناشی از این مدل را می توان با استفاده از نوع دیگری از این مدل‌ها برطرف کرد که معروف به مدل‌های پیوسته بارش-رواناب می باشد. مدل‌های پیوسته بر خلاف مدل‌های تک واقعه‌ای، برای شبیه‌سازی جریان‌های فصلی، ماهانه و روزانه مناسب هستند. در این نوع مدل‌ها جریان آب با استفاده از رخدادهای اقلیمی (بارش، تبخیر و تعرق) که به صورت پیوسته زمانی در طولانی مدت (شامل زمان‌های خشک و تر) واقع می شود، شبیه‌سازی شده که دیگر نیاز به برآورد تعیین کننده رطوبت قبلی خاک نمی باشد.

مطابق با کار فلمینگ و وینسنت [۵]، پارامترهای ذخیره پوشش گیاهی، ذخیره سطحی، سطح نفوذ ناپذیری با استفاده از تکنیک GIS و RS برای این پژوهش به دست آمد که نتایج قابل قبولی حاصل شد. همچنین تعیین مقادیر واقعی آن با استفاده از جدول‌های مطالعه فلمینگ و وینسنت [۵] انجام شد. پارامترهای ضریب ذخیره و ذخیره

9. Khazaei, M.R., Zahbiyoun, B. and Saghafian, B. 2009. Simulation of daily flow using continuous rainfall-runoff model for Karun Basin. 8<sup>th</sup> International Congress of Civil Engineering. Shiraz.
10. Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M. and Saindon, L.G. 1983. Precipitation-runoff modeling system user's manual, Water-Resources Investigations 83-4238. United States Department of the Interior, Geological Survey, Denver, CO.
11. Rezaeianzadeh, M., Stein, A., Tabari, H., Abghari, H., Jalalkamali, N., Hosseinipour, E.Z. and Singh, V.P. 2013. Assessment of a conceptual hydrological model and artificial neural networks for daily outflows forecasting. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 10: 1181-1192.
12. Sharifi, F. 1997. An Investigation into rainfall-runoff process modelling aiming at estimating runoff from Ungauged Catchments, 8th International Conference on Rainwater Catchment Systems (ICRCS), 21-25 April 1997, page 500-516, Tehran, Iran.
13. Singh, W., Manoj, R. and Jain, K. 2015. Continuous hydrological modeling using soil moisture accounting algorithm in Vamsadhara river basin, India. *Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering*. 4(4): 398-408.
1. Bennett, T.H. 1998. Development and application of a continuous soil moisture accounting algorithm for the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). MS thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis. 210 pp.
2. Beven, K.J. 2012. Rainfall-runoff modelling: the primer. Chichester, UK, Wiley-Blackwell. 248 pp.
3. Carpenter, T.M. and Georgakakos, K.P. 2007. Modeling of flash flood occurrence of California San Diego. American Geophysical Union, Fall Meeting.
4. Cunderlik, J.M. and Simonovic, S.P. 2005. Hydrological extremes in a southwestern Ontario river basin under future climate conditions. *Hydrological Sciences*. 50(4): 631-654.
5. Fleming, M. and Vincent, N. 2004. Continuous hydrologic modeling study with the hydrologic modeling system. *Journal of Hydrologic Engineering*. 9(3): 175-183.
6. Ghafouri, M.R., Taheri Shahraini, H. and Saghafian, B. 2013. Modeling of continuous daily runoff of Karoon River using SMA loss function. *Iran-Water Resources Research*. 9(2): 73-77.
7. Gholinezhad, K. 2010. Investigation of flood occurrence in terms of dry and wet periods based on historical statistics and long run simulation of rainfall-runoff (case study: Nekarood basin-subbasin of Gelvard).
8. Groke, B.F.W., Merritt, W.S. and Jakeman, A.J. 2004. A dynamic model for predicting hydrologic response to land covers changes in gauged and ungauged catchments. *Journal of Hydrology*. 291: 115-131.



## Abstract

## Simulation of Nekarood Daily Streamflow using Continuous Soil Moisture Accounting Model

M. Khoshravesh\*<sup>1</sup> and R. Norooz<sup>2</sup>

Received: 2017/11/03 Accepted: 2018/04/24

Application of continuous hydrological models and its calibration methods development using geographic information systems are increasingly expand. The purpose of this study is calibration and validation of SMA model and simulation of continuously river flow in Neka basin. In this study, firstly the temperature and precipitation variables prepared for the model and then SMA parameters were calculated for different period of calibration. The parameter estimates needed analyzed in GIS for the different period and finally validation and its accuracy was estimated. Generated hydrograph from the scenarios set of model parameters was compared in Gelvard observation station. Annual calibration and validation results showed that the observed and simulated correlation coefficient was 0.80 and 0.75, respectively. Also, for the validation period the objective function of AEPM (10.17) had a better matching than the calibration period (18.26). By simulating the flow river using climatic events which continuously over a long period of time, the daily discharge is obtained and showed the satisfactory results. Using this model for estimating of stream flow, the study of climate change, changes in land use and therefore better management of water resources is possible.

**Keywords:** Climate, Continuous flow, GIS, Neka river, Rainfall-runoff model, Sensitivity analysis.

1. Assistant Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran; Corresponding author's, Email: khoshravesh\_m24@yahoo.com

2. Assistant Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.