نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال هفتم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹
صفحات ۱۲۱ تا ۱۳۴

پیش بینی اثر تغییرات اقلیمی روی هیدروگراف رودخانه با استفاده از مدلWetSpa
مطالعه موردی: آبخیز طالقان استان البرز

حسام هروی، دانشجوی دکتری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
علی نجفی نژاد[1]، دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
عبدالرضا بهره مند، دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
حسین زینی وند، دانشیار، دانشگاه لرستان

دریافت مقاله : ۱۳۹۸/۰۴/۰۳ پذیرش نهایی:۱۳۹۸/۰۹/۱۷

چکیده

یکی از مسائل عمده در مهندسی هیدرولوژی پیش بینی چگونگی طغیان یا فروکش سیل یا صعود و نزول هیدرگراف رودخانه در نقطه مشخصی از آن است که در این بین اهمیت اقلیم به دلیل نوسانات زیاد در دبی سیلاب رودخانه بسیار مشهود است و بنابراین از مهمترین عواملی است که باید مورد مطالعه دقیق قرار گیرد. هدف اصلی این پژوهش بررسی گذشته و پتانسیل آینده تغییرات اقلیمی و پیش بینی اثرات آن روی هیدروگراف رودخانه می باشد. بدین منظور آبخیز طالقان از زیرحوزه های سفیدرود به عنوان مطالعه موردی به دلیل اهمیت اقتصادی- اجتماعی آن انتخاب گردید. در ابتدا با استفاده از داده های هواشناسی با گام زمانی روزانه در یک دوره آماری ۲۱ ساله، همچنین تلفیق اطلاعات سه نقشه اصلی مدل، شبیه سازی هیدروگراف رودخانه با استفاده از مدل WetSpa در آبخیز طالقان صورت پذیرفت. نتایج شبیه سازی نشان می دهد تطابق قابل قبولی بین داده های شبیه سازی شده مدل و مشاهدات در دوره پایه وجود دارد. سپس تغییرات اقلیمی آینده(بارش،دما و تبخیر) بر اساس خروجی مدل CanESM۲ از گزارش پنجم IPCC تحت سناریو جدید انتشار به نام RCP۸,۵ به عنوان ورودی مدل WetSpa برای پیش بینی هیدروگراف رودخانه در بازه زمانی آینده (۲۰۲۹-۲۰۱۶) و مقایسه آن با دوره پایه(۲۰۱۵-۱۹۹۵) استفاده گردید. نتایج نشان داد در سناریو مورد بررسی، افزایش۴۵ درصدی میانگین رواناب کل حوضه تحت تأثیر اقلیم در آینده نزدیک می باشد. همچنین میانگین دبی در تمامی ماه های سال(به استثنای ماه اکتبر)در دوره آینده نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت که این افزایش برای ماه آوریل محسوس تر می باشد.

واژه های کلیدی: سناریوی انتشار، سیل، شبیه سازی، مدل هیدرولوژیک، هیدروگراف رودخانه .

[1] . نویسنده مسئول: Email: najafinejad@gau.ac.ir

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.1.9]

مقدمه:

سیل به عنوان یکی از بزرگترین مخاطرات محیطی به وضعیتی گفته می شود که در آن جریان رودخانه و سطح آب به صورت غیر منتظره افزایش پیدا کرده و باعث خسارات جانی و مالی گردد(علیزاده،۱۳۸۶:۷۳۴). با توجه به عدم حفاظت کامل در برابر خطر سیلاب (Moore and Palmer,۲۰۰۵)، زیستن در کنار آن و اعمال سیاست های جدید به منظور کاهش آثار تخریبی آن و پیش بینی دبی سیلاب رودخانه در محل پروژه های آبی یکی از عوامل بسیار مهم طراحی است(Hosking and Wallis,۱۹۹۳). از طرفی تغییرات اقلیمی به تغییرپذیری روند دراز مدت در وضعیت آب و هوایی یا تغییرات میانگین دما و بارندگی اشاره دارد که مدت زمان طولانی ادامه دارد (IPCC,۲۰۰۷). اهمیت آسیب پذیری منابع آب به تغییرات در الگوهای دما و بارش اثبات شده است (Lahmer et al,۲۰۰۱). که این در وهله اول در مقیاس های منطقه ای و محلی می باشد که می توان از سیاست ها و اقدامات فنی برای جلوگیری یا کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی به محیط طبیعی و جامعه استفاده کرد. بررسی های اخیر نشان می دهد که زمین به طور کلی در طول قرن گذشته از حدود ۰/۶°C±۰/۲°C با مقدارهای محلی و فصلی متفاوت گرم شده است(IPCC,۲۰۰۷). که این تغییرات الگوی منطقه ای بادها و توزیع بارش را تغییر می دهد. تغییرات در الگو و شدت بارش، ذوب یخ، افزایش بخار آب اتمسفر و سایر موارد، تغییر پذیری قابل توجه برای سال ها تا دهه ها دارد که روند بلند مدت تغییرات را پوشش می دهد (Bates et al,۲۰۰۸). نگرانی زیادی در مورد تغییرات اقلیمی وجود دارد که می تواند تغییرات چرخه های هیدرولوژیکی، مقدار آب در دسترس و پاسخ های هیدرولوژیکی حوضه را تغییر می دهد. جاری شدن رواناب معمولاً نتیجه بارندگی ها ی شدید و ذوب شدن برف است که طی فرایندها ی نامبرده، رود از مرز اصلی خود فراتر رفته و یا به عبارتی دیگر، رود طغیان می کند. این نوع از جاری شدن رواناب را با عنوان سیلاب رودخانه، طبقه بندی کرده اند(Jonkman,۲۰۰۵). در این مورد افزایش تبخیر همراه با تغییرات ویژگی های بارندگی پتانسیل تغییر رواناب و فراوانی و شدت سیلاب را به همراه دارد(Zhang et al,۲۰۰۱; Brown et al,۲۰۰۵).

مطالعاتی به منظور بررسی اثرات سناریوهای تغییرات اقلیمی بر دبی سیلاب انجام شده است. تحقیقات انجام شده توسط اشنفی(Ashnafi,۲۰۱٤) با بکارگیری مدل SWAT در حوزهٔ آبخیز رودخانهٔ گبا در اتیوپی شمالی و بررسی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به تغییرات اقلیمی با استفاده از خروجی های مدل گردش عمومیHADCM۳ تحت سناریوهای انتشار A۲ و B۲ و روش ریز مقیاس سازی آماری و بکارگیری مدل SDSM نشان داد که حدود ۶۱٪ از بارش حوضه از طریق تبخیر و تعرق از دست می رود، ۱۸٪ تبدیل به رواناب سطی و مابقی صرف نفوذ عمقی می شود. حیات زاده (۱۳۹۵)، با استفاده از خروجی های مدل گردش عمومی HADCM۳ تحت سناریو های انتشار A۲، B۱ و A۱B با مدل LARS-WG و مدل نیمه توزیعی SWAT ، ضمن بیان کارایی قابل قبول مدل در این حوضه و اجرای مدل برای شرایط آینده بیان کردند که افزایش ۶/۲۲ درصدی میزان رواناب در آینده نزدیک با احتمال بیش از ۹۰ درصد تحت تاثیر تغییر اقلیم (بارش و دما) در منطقه می باشد. اسدی(Asadi et al,۲۰۱۷) با بررسی اثرات تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل BASINS-WinHFPF در آبخیز kor در جنوب غربی ایران تحت سناریوهای اقلیمی RCP برای دوره آینده نزدیک بیان داشتند، بیشترین افزایش جریان سطحی تا ۱۷۰٪ تحت سناریو RCP۸,۵ در ماه دسامبر می باشد. لی (Li et al, ۲۰۱٦) با شبیه سازی اثرات تغییرات اقلیمی روی دبی سیلاب رودخانه در آبخیز رودخانه گراند کانادا با مدل اقلیمی PRECIS برای تولید داده های اقلیمی و مدل هیدرولوژیکیHIM برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی استفاده کردند؛ نتایج نشان داد اگرچه کل بارش سالانه در آینده به طور قابل توجهی تغییر نخواهد کرد، توزیع میان سالانه احتمالا تغییر خواهد کرد. انتظار می رود که در آب در دسترس در زمستان افزایش در حالی که احتمالا در تابستان بیش از اندازه کاهش می یابد و استراتژی های انطباق را در این مورد ضروری دانستند. کیم (Kim et al,۲۰۱۳) با بررسی اثرات تغییرات اقلیمی روی جریان رودخانه در حوضه Hoeya تحت سناریو های جدید انتشار از گزارش ارزیابی پنجم هیأت بین المللی تغییرات

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.1.9]

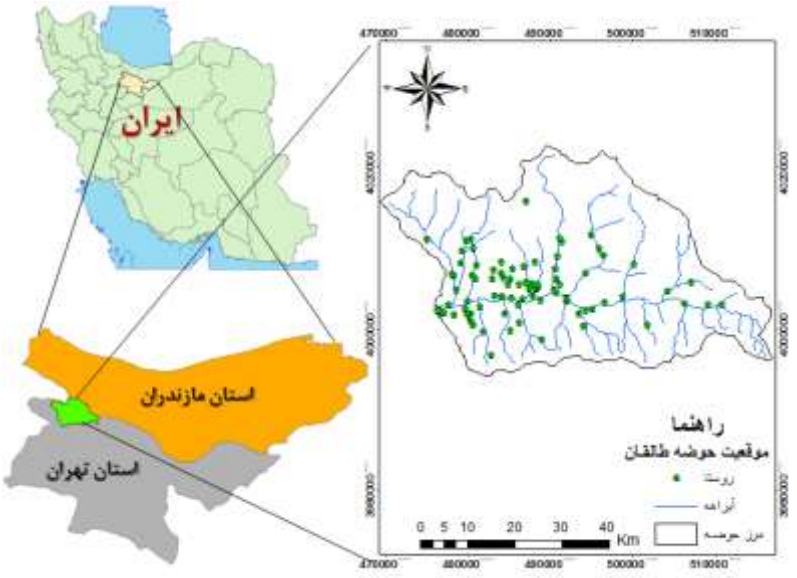
اقلیمی(IPCC)، با استفاده از مدل SWAT بیان کردند جریان رودخانه در فصل بهار و زمستان افزایش یافته اما در تابستان و پاییز کاهش یافته است.

با جمع بندی مطالب، می توان نتیجه گرفت بررسی تغییرات دبی سیلاب رودخانه در اثر پتانسیل تغییرات اقلیمی در آینده، بینش ارزشمندی می دهد که چگونه رواناب حوضه به این تغییرات واکنش نشان می دهد. و مدیران را در اولویت بندی عوامل مؤثر بر روند سیلخیزی حوضه به منظور برنامه ریزی جهت کنترل سیلاب یاری می کند. پژوهش حاضر با هدف تعیین شرایط اقلیمی آینده و پیش بینی رواناب، تأثیر تغییرات اقلیمی بر هیدروگراف رودخانه را طی بازه زمانی آینده در آبخیز طالقان با استفاده از مدل WetSpa بررسی می نماید. روانابهای سیلابی در این منطقه در سال های اخیر به صورت یک معضل فراگیر اجتماعی- اقتصادی درآمده و برای ساماندهی آن می توان با تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدلهای هیدرولوژیک، اثر تغییرات اقلیمی را بر پتانسیل سیل خیزی حوزه های آبخیز بررسی کرد و اولویت بندی پتانسیل سیلخیزی مناطق پرخطر را به نحو مناسب تری انجام داد. با توجه به اینکه زیربنای مدیریت بحران بر پیشگیری است، واکاوی مناطق سیل خیز می تواند در برنامه ریزی های پیشگیرانه قبل از وقوع سیل مؤثر باشد. براین اساس، پرداختن به مسئله سیل و بررسی علل بروز و افزایش آن و همچنین ارائه راهکارهایی برای تخفیف و کاهش خطرات روانابهای سیلابی از جمله مواردی است که همواره باید موردتوجه متخصصان قرار گیرد.

داده ها و روش کار

الف) معرفی منطقه مورد مطالعه:

منطقه مورد مطالعه قسمتی از آبخیز طالقان با مساحت ۸۰۴ کیلومتر مربع است که بخش سراب و میانی حوزه را در برگرفته و بین عرضهای شمالی ″۴۸ ´۲۰ °۳۶ و ″۲۳ ´۵ °۳۶ و طولهای شرقی″۳۵ ´۳۹ °۵۰ و ″۷ ´۱۱ °۵۱ واقع شده است. آبخیز طالقان با ۵۹۱ میلیمتر متوسط بارندگی در سال و ۱۱/۶ درجه سانتی گراد متوسط دمای سالانه، دارای شیب متوسط ٪۴۰/۵ می باشد. طول رودخانه دائمی طالقان رود، ۵۲ کیلومتر و نقطه خروجی حوزه به ایستگاه هیدرومتری گلینک منتهی می شود. شکل۱موقعیت و محدوده آبخیز طالقان را نشان می دهد.



شکل۱. موقعیت جغرافیایی آبخیز طالقان

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.1.9]

ب) روش کار

- ساختار مدلWetSpa :

مدل پیوسته و توزیعی- مکانی WetSpa ، مدلی جهت پیش بینی سیلاب و شبیه سازی بیلان آبی در مقیاس حوزه آبخیز است که قابلیت پیش بینی هیدروگراف سیل در نقطه خروجی و یا هر نقطه در یک آبخیز با گام های زمانی متفاوت دقیقه ای، ساعتی، روزانه و غیره را داراست(Wang et al,۱۹۹۷; Zeinivand,۲۰۰۹). این مدل یک مدل توزیعی مکانی با پایه فیزیکی است که اولین بار در دانشگاه بروکسل بلژیک ابداع شده است (Wang et al,۱۹۹۷; Batelaan et al,۱۹۹۶). و سپس توسط De Smedt (et al, ۲۰۰۰) و (Liu et al, ۲۰۰۳) توسعه پیدا کرده است و تاکنون دائما در حال تکمیل بوده است. در مدل WetSpa، یک روش اصلاحی برای برآورد فرآیندهای رواناب سطحی و نفوذ ارائه شده است که عوامل توپوگرافی، پوشش زمین، رطوبت خاک و شدت بارش را در ایجاد رواناب و نفوذ مؤثر برشمرده است:

$$PE_i(t) = C_i(P_i(t) - I_i(t) + M_i)\left(\frac{\theta_i(t)}{\theta_{si}}\right)^{\alpha} \quad (۱)$$

$$F_i(t) = P_i(t) - I_i(t) - PE_i(t) \quad (۲)$$

$PE_i(t)$ بارش مازاد در سلول i (میلی متر)، $P_i(t)$بارش سلول i (میلی متر)، $I_i(t)$ هدررفت برگاب (میلی متر)، $\theta_i(t)$ محتوای رطوبت خاک در سلول i و زمان t (متر مکعب در متر مکعب)، M_i مقدار ذوب برف (میلی متر) ، α ضریب متغیر با شدت بارش، $F_i(t)$ مقدار نفوذ در سلولi (میلی متر)، C_i ضریب بارش مازاد پتانسیل (ضریب رواناب پتانسیل) سلولi که در شرایط ایده‌آل تقریبا ثابت است. توان α در فرمول متغیری است که تأثیر شدت بارش بر روی ضریب بارش مازاد را منعکس کرده، مقادیر بالا برای شدت‌های بارش کم که رواناب کمتری به وجود آورده و برای شدت‌های زیاد نزدیک یک نظر گرفته می‌شود. مقادیر آستانه برای این ضریب با واسنجی تعیین می‌شود. اگر α برابر با یک باشد فرض می‌شود بین بارش مازاد و رطوبت خاک رابطه خطی وجود دارد. در مدل WetSpa، روندیابی جریان سطحی و جریان آبراهه با استفاده از روش معادله خطی موج پخشی صورت می‌گیرد. این روش شبیه‌سازی جریان ورقه‌ای و آبراهه‌ای مناسب بوده و از مزایای مهم آن این است که از طریق جبری قابل حل بوده و نیازی به محاسبات عددی و تعیین دقیق شرایط مرزی ندارد. معادله مومنتم سنت ـ ونانت، فرآیند جریان سلول را می‌تواند با استفاده از معادله خطی موج پخشی سنت ـ ونانت به صورت زیر شبیه‌سازی کند.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C_i\frac{\partial Q}{\partial x} - d_i\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (۳)$$

Q دبی جریان (متر مکعب بر ثانیه) در زمان t (ثانیه) و در مکان x (متر)، C_i سرعت موج سینماتیکی در سلول i (متر در ثانیه) ، d_i ضریب پخش در سلول i (متر در ثانیه) می‌باشد. تابع پاسخ لحظه‌ای سلول در خروجی سلول و در سرعت جریان و ضریب پخش ثابت با استفاده از توزیع چگالی اولین زمان عبور حرکت براونی جریان به صورت زیر خواهد بود.

$$U_i(t) = \frac{l_i}{2\sqrt{\pi d_i t^3}}\exp\left[-\frac{(C_i t - l_i)^2}{4 d_i t}\right] \quad (۴)$$

در معادله $U_i(t)$ تابع پاسخ لحظه ای سلول (عکس ثانیه)، l_i اندازه سلول (متر)، دو پارامتر C_i و d_i با استفاده از رابطه منینگ به صورت زیر آمده است.

$$C_i = \frac{5}{3}v_i \quad (۵)$$

$$d_i = \frac{v_i R_i}{2 S_i} \quad (۶)$$

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.1.9]

که در آن R_i شعاع هیدرولیکی متوسط سلول i (متر)، S_i شیب سلول (متر بر متر) و v_i سرعت جریان در سلول i (متر بر ثانیه) می‌باشد. در نهایت پاسخ جریان در انتهای مسیر برای ورودی دلخواه به سلول آغازی، با مجموع حاصل‌ضرب حجم رواناب ورودی در تابع پاسخ مسیر جریان واحد محاسبه می‌شود. بنابراین دبی هیدروگراف برای یک ورودی دلخواه با معادله زیر تعیین می‌شود:

$$Q_i(t) = \sum_{\tau}^{t-\tau} V_i(\tau) U_i(t-\tau) \qquad (۷)$$

که در آن $Q_i(t)$ دبی خروجی در انتهای مسیر جریان با ورودی دلخواه در سلول i (مترمکعب بر ثانیه)، $U_i(t-\tau)$ تابع پاسخ مسیر جریان (عکس ثانیه) معادل هیدروگراف واحد لحظه‌ای و τ زمان تاخیر(ثانیه) و $V_i(\tau)$ حجم رواناب ورودی (مترمکعب) در سلول i و در زمان τ شامل رواناب سطحی، جریان زیرسطحی و رواناب آب‌های زیرزمینی(در صورتی که سلول i در خروجی زیرحوزه واقع شده باشد) می‌باشد. پاسخ جریان حوزه با در نظر گرفتن قابلیت تفکیک مکانی در روش روندیابی خطی، حاصل مجموع پاسخ تمام سلول‌ها می‌باشد. بنابراین پاسخ جریان در کل حوضه را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$Q(t) = \sum_{i=j}^{N_w} Q_i(t) \qquad (۸)$$

در معادله $Q(t)$ دبی کل در خروجی حوزه (مترمکعب بر ثانیه) و N_w تعداد کل سلول‌های حوضه می‌باشد. برای دریافت اطلاعات و جزئیات بیشتر در زمینه تئوری مدل به راهنمای کاربر مدل مراجعه شود(Liu et al, ۲۰۰٤).

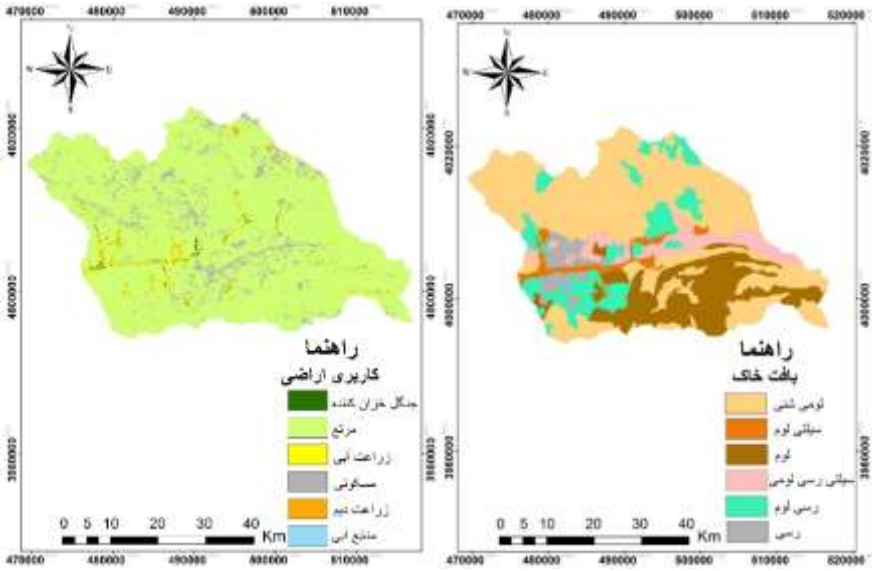
نقشه های مدل رقومی ارتفاع به همراه بافت خاک و کاربری اراضی حوضه(شکل۲) و سری های زمانی بارش، تبخیر و دما(در صورتی که بارش به صورت برف باشد) و دبی(برای ارزیابی مدل)، ورودی های اصلی مدل هیدرولوژیکیWetSpa می باشند. سری های زمانی مدل دارای گام زمانی روزانه و بصورت پیوسته و همزمان مربوط به دوره آماری ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۵ مربوط به ۸ ایستگاه باران سنجی به همراه ۳ ایستگاه هواشناسی داخل و خارج حوضه و ایستگاه هیدرومتری خروجی حوضه می باشند که توسط وزارت نیرو تاسیس و مورد بهره برداری قرار می گیرند. برای اطمینان از دسترسی به آمار و اطلاعات اقلیمی کافی و دقیق یک حریم جغرافیایی بیشتر از مرز حوضه در نظر گرفته شد که در نهایت با استفاده از روش تیسن پلیگون و مرز حوضه، ایستگاههای مؤثر جهت استفاده در مدل مشخص و ایستگاههای دور و با فاصله زیاد حذف شد و نهایتاً ۸ ایستگاه باران سنجی، ۲ ایستگاه دماسنجی و ۲ ایستگاه تبخیرسنجی انتخاب شد که در انتهای این مرحله هیدروگراف جریان برای وضعیت موجود آبخیز طالقان شبیه سازی شد. واسنجی مدل برای ۱۴ سال ابتدای دوره آماری و اعتبارسنجی مدل برای دوره ۷ سال انتهای دوره آماری با تغییر دادن ۱۱ پارامتر کلی انجام می شود. اعتبار سنجی مدل به منظور بررسی درستی مجموعه پارامترهای بهینه شده در مرحله واسنجی مدل با دسته پارامتر بهینه در یک دوره آماری دیگر انجام می شود. برای ارزیابی نتایج خروجی مدل از معیار آماری ناش- ساتکلیف استفاده می شود. و معادله آن به شرح زیر می باشد:

$$NS = ۱ - \frac{\sum_{i=۱}^{n}(Qsi - Qoi)۲}{\sum_{i=۱}^{n}(Qoi - \bar{Q}o)۲} \qquad (۹)$$

NS: ضریب کارایی ناش- ساتکلیف .که در آن Qoi وQsi جریان شبیه سازی شده و مشاهده ای در گام زمانیi (مترمکعب بر ثانیه) ،$\bar{Q}o$: متوسط جریان مشاهده ای در کل دوره شبیه سازی،n:تعداد گام های زمانی در طول دوره شبیه سازی است. مقدار معیار ناش- ساتکلیف از یک مقدار منفی تا ۱ در تغییر است و زمانی که میزان آن به عدد ۱ رسید، نمایانگر انطباق کامل بین هیدروگراف های مشاهده ای و شبیه سازی شده حوضه می باشد(Nash and Sutcliffe, ۱۹۷۰).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.1.9]



شکل۲. نقشه بافت خاک و کاربری اراضی آبخیز طالقان

-تولید سناریو اقلیمی برای دوره آینده:

در این پژوهش از خروجی های مدل CanESM۲ تحت سناریویRCP۸,۵ در گزارش پنجمIPCC به عنوان چهارمین نسل از مدل‌های آب‌وهوایی که با استفاده از مرکز مدل‌سازی و تحلیل آب‌وهوایی کانادا (CCCma) زیر نظر سازمان محیط زیست این کشور توسعه یافته استفاده می گردد. در این مدل کل زمین به صورت ۱۲۸*۶۴ سلول شبکه بندی شده است و دارای شبکه‌ای با ابعاد ۱ در ۱ درجه طول و عرض جغرافیایی می‌باشد. سناریوی RCP۸,۵ که در سال ۲۰۱۰ توسط یک کمیته علمی و زیر نظر هیئت بین الدول تغییرات اقلیمی با هدف مهیا نمودن مجموعه ای از اطلاعات ارائه شده بدون اتخاذ هیچ‌گونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، آب‌وهوای کره زمین در خط سیر سناریوی انتشار جدید ۸,۵ RCP پیش خواهد رفت. به طوری که ادامه این روند منجر به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌گردد. در این هنگام غلظت دی اکسید کربن به ۱۰۰۰ ppm رسیده و همچنان روند افزایشی خواهد داشت. این سناریو توسط تیم مدل‌سازی MESSAGE و موسسه IIASA به سرپرستی پروفسور کیوان ریاحی در موسسه بین‌المللی آنالیز سیستم‌های کاربردی IIASA اتریش توسعه و طراحی شد که وجه مشخصه آن روند افزایش گازهای گلخانه‌ای است(Riahi et al, ۲۰۱۱).

یکی از مشکلات عمده در استفاده از خروجی مدل‌های AOGCM بزرگ‌مقیاس بودن سلول محاسباتی آن‌ها، به لحاظ مکانی و زمانی نسبت به منطقه مورد مطالعه است. مدل آماری SDSM بسته نرم افزاری کاربر پسندی است که برای انجام روش های ریز مقیاس سازی آماری در تولید با و ضوح بالای اطلاعات ماهانه آب و هوا، با شبیه سازی از مدل های آب و هوایی با قدرت تفکیک پایین(GCM) به کار می روند. در این پژوهش آخرین نسخه از این مدل مورد استفاده قرار گرفت که جزئیات آن توسط (Wilby and Dawson, ۲۰۰۷) به تفضیل ارائه شده است.

به‌طورکلی ورودی‌های مدل SDSM به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند :

۱- داده‌های مشاهداتی ایستگاهی برحسب نوع خروجی موردنیاز

۲- داده‌های بزرگ‌مقیاس NCEP و GCM به‌دست‌آمده از نزدیک‌ترین شبکه جهانی به منطقه مورد مطالعه

در مطالعات تغییر اقلیم، عموماً دوره زمانی (۲۰۰۵-۱۹۶۱) به‌عنوان دوره پایه جهت واسنجی مدل استفاده می‌شود(Wilby et al, ۲۰۰۲). در این پژوهش جهت واسنجی مدل با توجه به داده های اقلیمی موجود و همچنین درک اثرات تغییرات بارش به دلیل نوسانات زیاد ، برای متغیر دما و تبخیر دوره آماری ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۵ و برای متغیر بارش بازه زمانی اول ژانویه سال

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOI: 10.29252/jsaeh.7.1.9]

۱۹۸۵ تا پایان د سامبر ۲۰۰۵ با گام زمانی روزانه به عنوان مبنای تغییر اقلیم گذ شته جهت وا سنجی مدل مورد ا ستفاده قرار گرفتند.

ابتدا از داده‌های NCEP که شامل ۲۶ متغیر م ستقل اتم سفری می‌با شد، جهت کالیبره کردن و تعیین متغیرهای پیش‌بینی کننده ا ستفاده شد. حال مدل کالیبره شده قادر ا ست با کمک این داده ها اقدام به تولید داده‌های م صنوعی در بازه (۲۰۲۹-۲۰۱۶) نماید؛ اما در این داده‌های مصـــنوعی، ســـناریوهای گازهای گلخانه‌ای تأثیر ندارند. لذا مدل با بهره‌گیری از پیش‌بینی کننده‌های CanESM۲ که خود ســناریو واداشــت تابشــی را در آن گنجانده‌اند و به طور همزمان و با توجه به ســناریو واداشــت تابشی، اقدام به ایجاد سناریو اقلیمی می‌نماید. سپس با تطابق سناریو حاصل از مدل CanESM۲ و داده‌های مصنوعی حاصل از پیش‌بینی کننده NCEP، نهایتاً داده‌های ریزمقیاس شده خروجی که دما، بارش و تبخیر و تعرق روزانه ایستگاهی هستند، ارائه می‌گردند. برای انتخاب پیش‌بینی کننده‌ها، نرم‌افزار SDSM بین ســـری مشـــاهداتی روزانه منطقه و متغیرهای بزرگ مقیاس مشاهداتی منطقه (NCEP) رابطه‌ای با حداکثر ضریب همبستگی برقرار نموده و سپس با استفاده از پارامترهای به دست آمده از این رابطه، با به‌کارگیری متغیرهای بزرگ مقیاس حا صل از مدل CanESM۲ و سناریو دوره آتی، سری زمانی پارامتر مورد نظر را در منطقه تولید می‌کند. پس از انتخاب بهترین پیش‌بینی کننده‌ها از مجموعه NCEP عملیات پیش‌بینی دما، بارش و تبخیر و تعرق برای دوره آینده صورت می‌گیرد. پس از تولید داده‌های روزانه برای دوره‌های مذکور، از خروجی‌های بارش، دما و تبخیر و تعرق مدل میانگین‌گیری شده و میانگین ماهانه پارامترهای مذکور در دوره‌های آتی محاسبه می‌شود. سپس تغییرات آن‌ها نسبت به مقادیر میانگین دوره پایه محاسبه شده و نمودارهای تغییرات پارامترهای اقلیمی مربوط به هرکدام از ایستگاه‌ها ترسیم و تحلیل می‌گردد(اشکال ۵ تا ۷).

یکی از معیارهای ارزیابی موفقیت این پژوهش استفاده از مدل‌های GCM و سناریو جدید تحت عنوان RCP۸,۵ است که در حال حاضر دقیق‌ترین و به روزترین سناریو و مدل‌های جهانی هستند که در سطح جهانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این، جهت ارزیابی و تحلیل عملکرد مدل ریزمقیاس سازی مورد بررسی از شاخص‌های عملکردی مختلفی که شامل ضریب تعیین، میانگین مربعات خطا، مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطا استفاده شد که در بخش نتایج بدان پرداخته می شود.

بعد از اجرای اولیه مدل با وارد کردن نقشه کاربری اراضی، بافت خاک، مدل رقومی ارتفاع به علاوه آمار هیدرومتئورولوژی، هیدروگراف رودخانه در نقطه خروجی حوضه شبیه سازی می شود. در مرحله بعد برای شبیه سازی اثر سناریو تغییرات اقلیمی، با ثابت نگه داشتن اطلاعات ورودی و پارامترهای کلی واسنجی شده مدل به استثنای داده های اقلیمی، مدل به ازای سناریو جدید اقلیمی دوباره اجرا می شود. در نهایت مدل یک هیدروگراف خروجی متناسب با شرایط جدید ناشی از تغییرات اقلیمی آینده را شبیه سازی می کند که با مشاهده اختلاف بین هیدروگراف خروجی حوضه در دوره پایه و سناریو اقلیمی جدید، تغییرات رواناب ناشی از اقلیم قابل مشاهده می باشد.

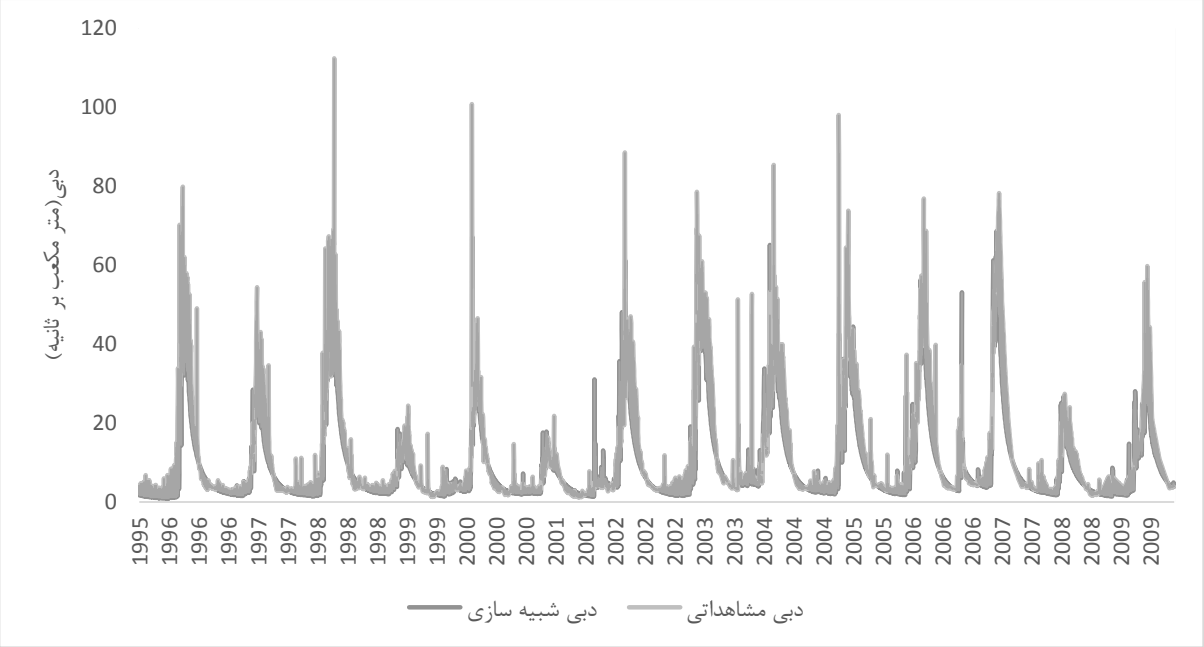
شرح و تفسیر نتایج

- **نتایج واسنجی و اعتبارسنجی شبیه سازی مدل:**

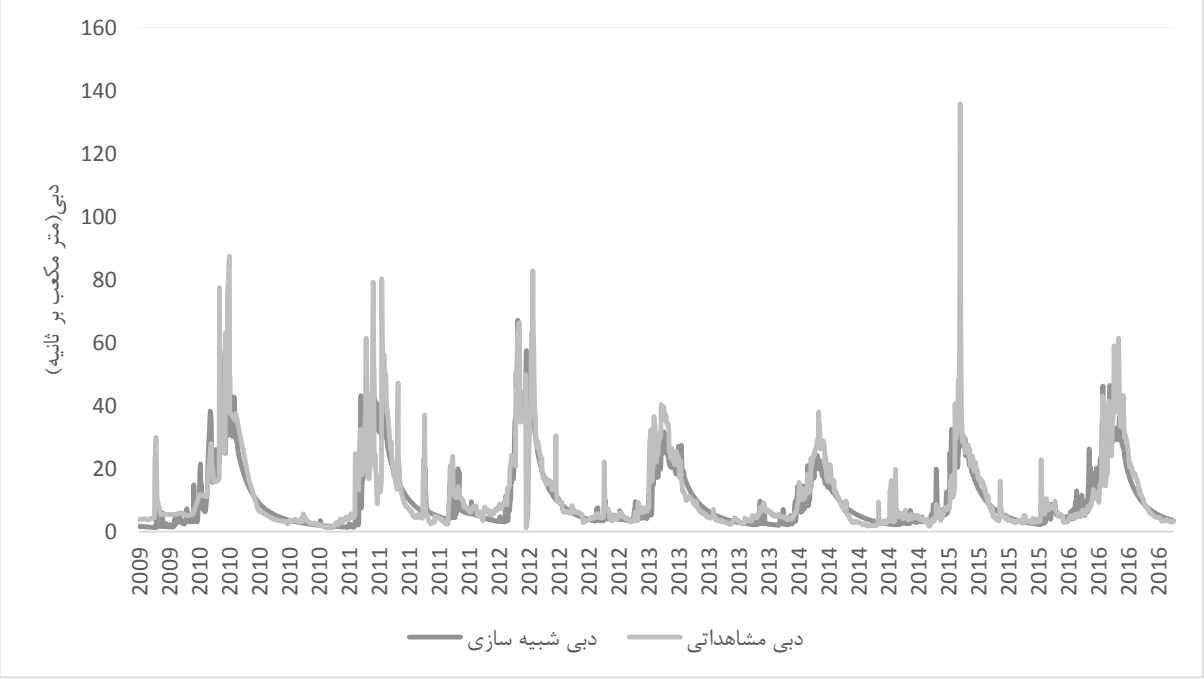
به منظور ارزیابی کارایی مدل WetSpa هیدروگراف شبیه سازی در مقایسه با هیدروگراف مشاهده ای در طول ۲۱ سال دوره آماری در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی مدل، به صورت گرافیکی و آماری بررسی شد. با توجه به شکل های۳ و ۴ مشخص می شود تطابق قابل قبولی بین داده های شبیه سازی شده مدل و مشاهدات در دوره پایه در حوزه آبخیز طالقان وجود دارد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.1.9]



شکل۳. مقایسه هیدروگراف روزانه شبیه سازی و مشاهداتی در آبخیز طالقان در دوره واسنجی



شکل۴. مقایسه هیدروگراف روزانه شبیه سازی و مشاهداتی در آبخیز طالقان در دوره اعتبار سنجی

ارزیابی کارایی مدل WetSpa : مقادیر معیارهای ارزیابی مدل بر اساس معیار ناش- ساتکلیف برای جریان های متوسط، کم و زیاد و همچنین، میزان خطای مدل در شبیه سازی بیلان آبی نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.1.9]

جدول ۱. مقادیر معیارهای کارایی مدل در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی

معیار	واسنجی	اعتبارسنجی
انحراف مدل (Model Bias)	-۲/۸۱	-۱/۲
ناش-ساتکلیف	۰/۷۶	۰/۷
ناش-ساتکلیف برای جریان های کم	۰/۷۲	۰/۷
ناش-ساتکلیف برای جریان های زیاد	۰/۷۵	۰/۶۹

- **نتایج پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در دوره آینده:**

نتایج حاصل نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین مقادیر مدل شده و مقادیر مشاهداتی آن‌ها با خطای بحرانی ۰/۵ وجود ندارد و مقادیر همبستگی پیرسون بین داده‌های مدل شده و واقعی در سطح معنی‌داری ۰/۱ قابل‌قبول می‌باشند. بررسی شاخص‌های خطاسنجی (RMSE، MSE و MAE) نیز بیانگر آن است که مدل ریزمقیاس سازی SDSM از کارایی مناسبی جهت ریزمقیاس سازی پارامترهای مورد بررسی در حوضه مورد مطالعه برخوردار است(جداول ۲ تا ۴).

جدول ۲. عملکرد مدل SDSM در شبیه‌سازی بارش ایستگاه‌های مورد بررسی

ایستگاه	MSE	RMSE	MAE	R^2
A	۰/۲۶	۰/۱۵	۰/۳۵	۰/۹۹
B	۱/۵۵	۱/۰۷	۰/۸۳	۰/۹۹
C	۰/۶۱	۰/۸۱	۰/۵۸	۰/۹۹
D	۱/۴۹	۱/۲۲	۰/۹	۰/۹۹
E	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۵۸	۰/۹۹
F	۱/۲۴	۱/۴۱	۰/۸۸	۰/۹۹
G	۲/۳۶	۱/۵۷	۱/۰۲	۰/۹۹
H	۰/۹۳	۰/۹۶	۰/۶۹	۰/۹۹

جدول ۳. عملکرد مدل SDSM در شبیه‌سازی دما ایستگاه‌های مورد بررسی

ایستگاه	MSE	RMSE	MAE	R^2
A	۰/۰۲	۰/۱۸	۰/۱۴	۰/۹۹
B	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۹۹

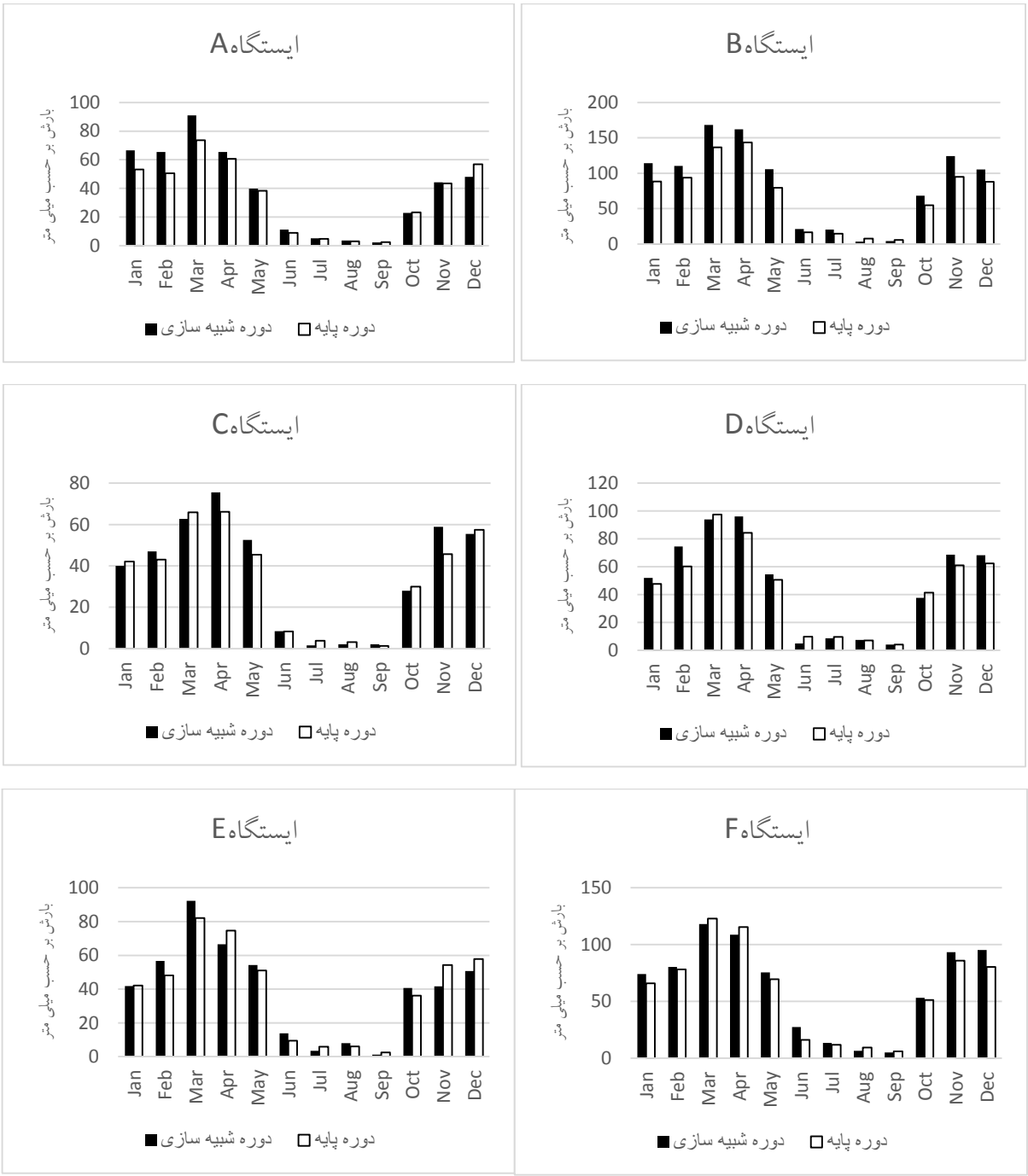
جدول ۴: عملکرد مدل SDSM در شبیه‌سازی تبخیر و تعرق ایستگاه‌های مورد بررسی

ایستگاه	MSE	RMSE	MAE	R^2
A	۲/۱۷	۱/۴۷	۱/۰۲	۰/۹۹
B	۰/۶۸	۰/۸۳	۰/۵۶	۰/۹۹

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

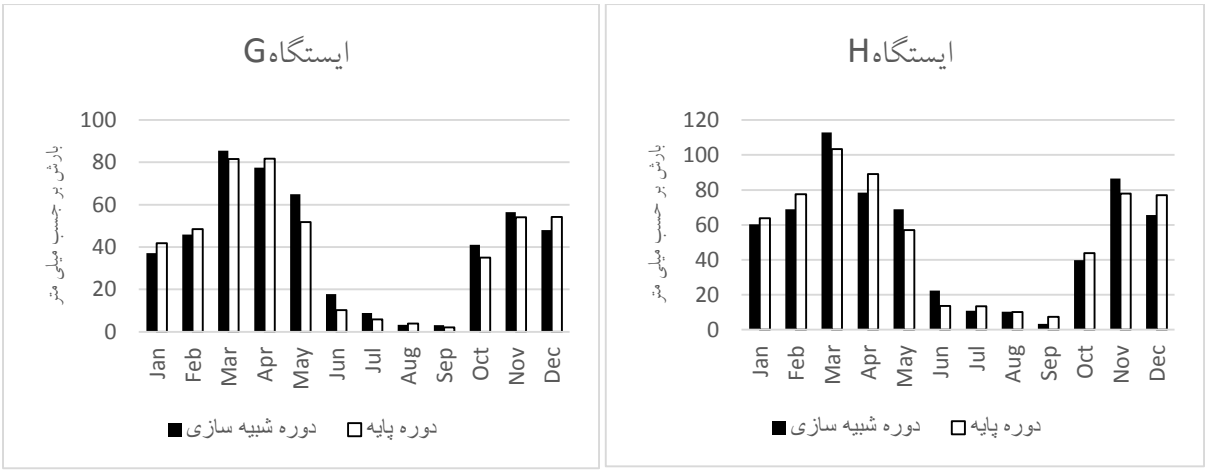
[DOI: 10.29252/jsaeh.7.1.9]

نتایج حاصل از بررسی مقادیر ماهانه بارش در ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد مطالعه نشان می‌دهد که به دلیل گستردگی آبخیز طالقان روند کاهشی یا افزایشی تغییرات بارش ماهانه این حوضه در سال های آینده در مناطق مختلف در مقیاس ایستگاهی متفاوت خواهد بود. به طوری که بالاترین میانگین بارش در آبخیز طالقان در مناطق شمال غربی حوضه و مربوط به ایستگاه B دیده بانی شده است و پیش بینی می شود در آینده میانگین بارش سالانه کل حوضه ۸ درصد افزایش یافته و مناطق بیشتری از حوضه را تحت تاثیر قرار دهد(شکل ۵).



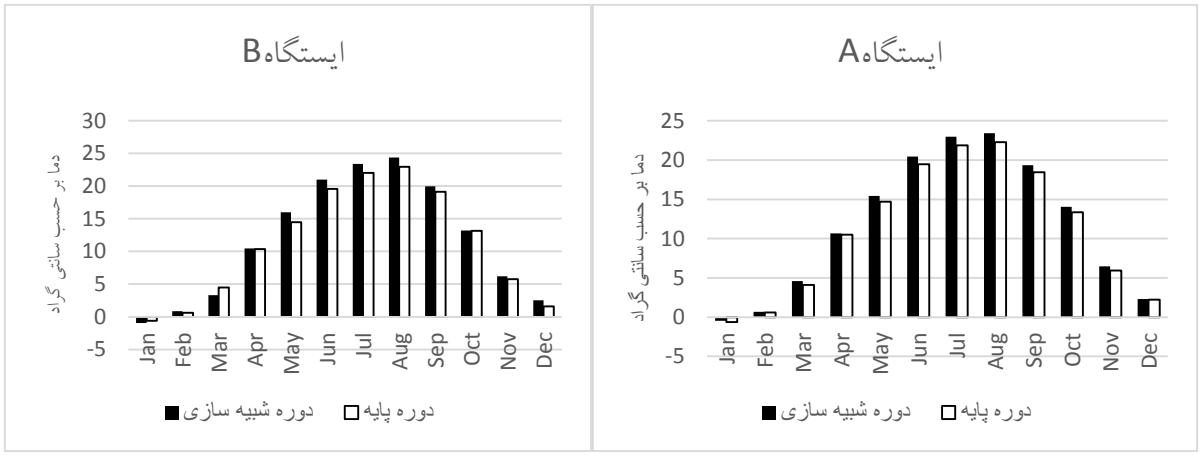
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.1.9]



شکل ۵. تغییرات ماهانه بارش در دوره ۲۰۲۹- ۲۰۱۶ نسبت به دوره پایه

متوسط ماهانه دما در ایستگاه‌های مورد مطالعه در این دوره نسبت به دوره پایه نیز نشان می‌دهد که میزان دما در بیشتر ماه‌های سال بر اساس سناریوی مورد بررسی در هر دو ایستگاه دما سنجی در سطح حوضه نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. همچنین پیش بینی می شود میانگین دمای سالانه این حوضه با افزایش میانگین ۰/۵ و ۰/۶ سانتی گراد به ترتیب برای ایستگاه A و B در سناریو مورد بررسی در دهه آتی مواجه باشد. (شکل ۶).

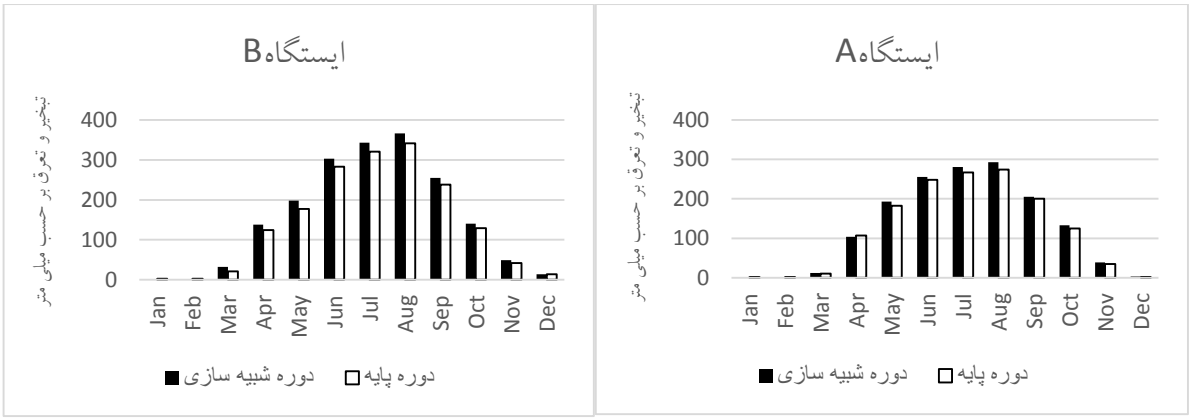


شکل۶. تغییرات ماهانه دما در دوره ۲۰۲۹- ۲۰۱۶ نسبت به دوره پایه

تغییرات ماهانه تبخیر و تعرق ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره ۲۰۲۹- ۲۰۱۶ نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد که میزان تبخیر و تعرق در بیشتر ماه‌های سال بر اساس سناریوی مورد بررسی و همچنین در هر دو ایستگاه‌های تبخیرسنجی نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت (شکل۷).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

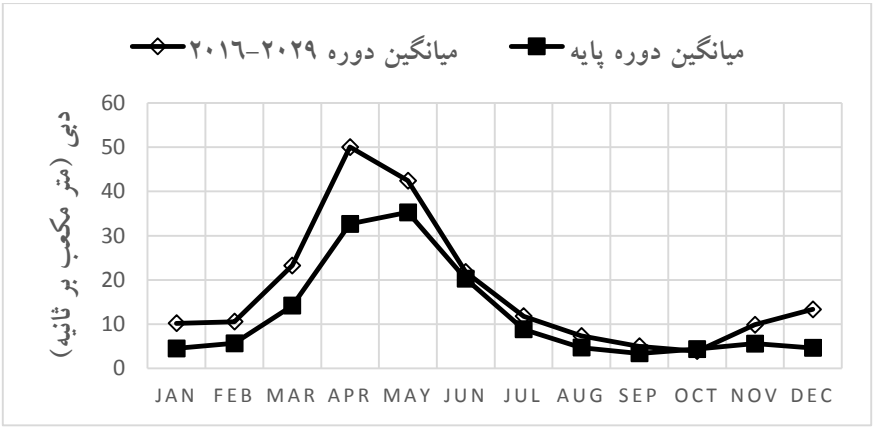
[DOI: 10.29252/jsaeh.7.1.9]



شکل ۷. تغییرات ماهانه تبخیر و تعرق در دوره ۲۰۲۹- ۲۰۱۶ نسبت به دوره پایه

- **نتایج پیش بینی هیدروگراف رودخانه دوره آینده در مقایسه با دوره پایه:**

ابتدا مدل برای شرایط اقلیمی گذشته اجرا و خروجی های مدل به صورت مقادیر متوسط رواناب ماهانه حوضه استخراج گردید. در گام دوم مدل WetSpa تحت شرایط اقلیمی جدید برای آینده نزدیک(۲۰۲۹-۲۰۱۶) اجرا گردید. خروجی مدل برای این مرحله نیز به صورت متوسط رواناب ماهانه استخراج گردید. بررسی خروجی مدل در مراحل فوق در آبخیز طالقان از گذشته تا شرایط آینده حاکی از افزایش میزان رواناب کل حوضه در آینده می باشد. با مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی شرایط اقلیمی آینده نسبت به دوره پایه، مشخص می گردد که میانگین رواناب کل حوضه ۴۵ درصد بر اساس سناریوی RCP۸,۵ افزایش خواهد یافت. همچنین میانگین دبی در تمامی ماههای سال(به استثنای ماه اکتبر) در دوره آینده نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت که بیشترین مقدار آن مربوط به ماه آوریل با حدود ۱۷/۳ متر مکعب بر ثانیه افزایش میانگین رواناب ماهانه حوضه نسبت به ماه مشابه در دوره پایه می باشد(شکل۸).



شکل ۸.پیش بینی اثر تغییرات اقلیمی بر رواناب در آبخیز طالقان برای دوره ۲۰۲۹-۲۰۱۶ در مقایسه با دوره پایه

نتیجه گیری

نتایج بدست آمده نشان می دهد که میانگین دبی سالانه در نقطه خروجی حوضه در دوره پیش بینی نسبت به دوره دیده بانی افزایش خواهد یافت. با آغاز فصل سرد در این حوضه مقادیر بارش افزایش خواهد یافت. بر این اساس دبی میانگین این ماه ها نیز افزایش می یابد. بطور کلی در فصل بهار بیشترین افزایش دبی را در این حوضه خواهیم داشت، البته دبی فصل تابستان نیز افزایش می یابد، اما به اندازه فصل بهار نیست که دلیل آن وجود ذخیره کافی منابع آب در کوه ها(برف) است. در هر دو سری داده های مشاهداتی و پیش بینی شده بیشترین مقادیر دبی برای فصل بهار است، اما مقادیر دبی پیش بینی شده در ماه آوریل

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOI: 10.29252/jsaeh.7.1.9]

افزایش قابل توجهی می یابد. با آغاز فصل گرم دبی های ماهانه این حوضه در دوره پیش بینی به نسبت دوره پایه کاهش شدیدی می یابد و این روال تا پایان دوره گرم در ماه سپتامبر ادامه خواهد داشت. در نتیجه شکل هیدرگراف رودخانه برآمده و نوک تیز تر خواهد بود. این تغییرات در حاشیه رودخانه و مناطق سیل خیز خطر رخداد سیل را افزایش و منطقه را مستعد روانابها و سیلابهای مهیب می نماید. با افزایش دما حتی در ماه های سرد به دلیل اینکه از تعداد روز های یخبندان کاسته شده، مقدار تبخیر نیز افزایش یافته و منابع آب در دسترس مانند رودخانه ها، چشمه ها، برکه ها در مقابل دماهای بالاتر تبخیر بیشتری خواهند داشت و مقدار بیشتری از بارش های دریافتی را از دسترس خارج می کند. همچنین بواسطه افزایش دما در آبخیز طالقان، نوع بارش های این حوضه به سمت بارش های مایع تغییر کرده و زمان پایداری ذخایر آب در حوضه کاهش خواهد یافت. کاهش زمان پایداری سبب افزایش طول دوره خشک و نیز افزایش دبی های اوج سیلاب در رودخانه و کاهش کیفیت منابع آب شیرین حوضه در آینده می گردد. نهایتا با توجه به نتایج حاصل از پژوهش می توان این گونه بیان داشت که با سناریو سازی در استفاده از مدلهای هیدرولوژیکی، پیش بینی وضعیت آینده تغییرات اقلیمی و اثرات آن روی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه در نظر گرفته شود؛ تا بتوان با استفاده از نتایج اینگونه تحقیقات در بحثهای مدیریتی و برنامه ریزی برای آمایش سرزمین، فعالیتهای مؤثر را با خطر کمتر و توسعه پایدار بیشتر در منطقه انتخاب کرد. به طوری که هر چه نتایج بدست آمده با واقعیت اختلاف کمتری داشته باشد، یک مدیر با قطعیت بیشتری می تواند از نتایج در سطح حوضه، برای تصمیم گیری در برنامه های مدیریت سیلاب استفاده نماید.

تشکر و قدردانی

در این پژوهش از همکاری شرکت مدیریت منابع آب ایران و شرکت سهامی آب منطقه ای تهران در رابطه با ارائه آمار و اطلاعات آبخیز طالقان سپاسگزاری و قدردانی می شود.

منابع

حیات زاده، مهدی.۱۳۹۵. *بررسی کارایی مدل SWAT جهت شبیه سازی اثر همزمان تغییر اقلیم و تغییر کاربری بر رواناب و رسوب در مناطق خشک (مطالعه موردی حوزه آبخیز فخرآباد یزد)*. رساله دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری. دانشکده کویر شناسی و منابع طبیعی،دانشگاه یزد.

علیزاده، امین.۱۳۸۶. *اصول هیدرولوژی کاربردی*، چاپ بیست و سوم. انتشارات دانشگاه امام رضا(ع). مشهد.

Asadi Vaighan, A.;N.Talebbeydokhti, and A. Massah Bavani.۲۰۱۷. Assessing the impacts of climate and land use change on stream flow, water quality and suspended sediment in the Kor River Basin, Southwest of Iran. *Environmental Earth Sciences*, ۷۶:۵۴۳.**DOI** ۱۰,۱۰۰۷/s۱۲۶۶۵-۰۱۷-۶۸۸۰-۶.

Ashenafi, A.A.۲۰۱٤. *Modeling Hydrological Responses to Changes in Land Cover and Climate in Geba River Basin, Northern Ethiopia*. PhD Thesis. Department of Earth Sciences, Berlin.

Batelaan,O.; Z.M.Wang and F. De Smedt.۱۹۹٦.*An adaptive GIS toolbox for hydrological modelling.* Laboratory of Hydrology, Free University Brussels, Pleinlaan ۲, B-۱۰۵۰ Brussels, Belgium

Bates, B.C.; Z. Kundzewicz W.S. Wu, and J.P. Palutikof.(eds.).۲۰۰۸. *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland.

Brown, A.E.;L. Zhang, T.A. McMahon, A.W.Western, and R.A. Vertessy.۲۰۰۵. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, **۳۱۰(۱):** pp. ۲۸–٦۱.

De Smedt, F.; Y.B. Liu and S. Gebremeskel. ۲۰۰۰. *Hydrologic modeling on a catchment scale using GIS and remote sensed land use information.* In: Risk Analysis II, Brebbia, C.A., Ed., WTI press, Southampton, Boston.

Hosking, J. R. M. and J. R. Wallis. (۱۹۹۳).Some statistics useful in regional frequency analysis. *Water Resources Research*, **۲۹ (۲):** ۲۷۱-۲۸۱.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.1.9]

IPCC,۲۰۰۷. Climate Change ۲۰۰۷: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. and Miller, H. L.(eds.). Cambridge, United Kingdom and New York City, NY, USA.

Jonkman, S. N. ۲۰۰۵.Global perspectives on loss of human life caused by floods. *Natural hazards*, **۳٤(۲):** ۱۵۱-۱۷۵.

Kim, J.;J. Choi,C. Choi, and S. Park.۲۰۱۳. Impacts of changes in climate and land use/land cover under IPCC RCP scenarios on streamflow in the Hoeya River Basin, Korea. *Science Total Environment*, **٤٥٢–٤٥٣:**۱۸۱–۱۹۵. **DOI**:۱۰,۱۰۱٦/j.scitotenv.۲۰۱۳,۰۲,۰۰۵.

Lahmer, W.;B. Pfützner, and A. Becker. (۲۰۰۱). Assessment of Land Use and Climate Change Impacts on the Mesoscale. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, **۲٦**: pp. ٥٦٥–٥٧٥. https://**DOI**.org/۱۰,۱۰۱٦/S۱٤٦٤-۱۹۰۹(۰۱)۰۰۰۵۱-X.

Li, Z.;G. Huang,X. Wang, J.Han, and Y. Fan.۲۰۱٦. Impacts of future climate change on river discharge based on hydrological inference: a case study of the Grand River Watershed in Ontario, Canada. *Science Total Environment*, **٥٤٨–٥٤٩**:۱۹۸–۲۱۰. **DOI**:۱۰,۱۰۱٦/j. scitotenv.۰۱,۰۰۲.

Liu, Y.B.; S Gebremeskel, F. De Smedt, L. Hoffmann, and L. Pfister. ۲۰۰۳. A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling. *Journal of Hydrology*, **۲۸۳**: ۹۱–۱۰٦.

Liu, Y. B. and F. De Smedt.۲۰۰٤. *WetSpa Extension, A GIS-based Hydrologic Model for Flood Prediction and Watershed Management, documentation and user manual*. Vrije universiteity Brussel(VUB), Belgium.

Moore, A. A. and Palmer, M. A. (۲۰۰۵), Invertebrate biodiversity in agricultural and urban headwater streams: implications for conservation and management, *Ecological Applications*, **۱۵(٤):** ۱۱٦۹-۱۱۷۷.

Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe.۱۹۷۰. River flow forecasting though conceptual models. Part ۱-A discussion of principles. *Journal of hydrology*, ۱۰: ۲۸۲-۲۹۰.

Riahi, K.;Sh. Rao, V.Krey, Ch. Cho, and et al. ۲۰۱۱. RCP ۸,۵—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, ۱۰۹:۳۳–۵۷. **DOI** ۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۵۸٤-۰۱۱-۰۱٤۹-y

Wang, Z.; O. Batelaan, and F. De Smedt.۱۹۹۷. A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). *Physics Chemistry of the Earth*. **۲۱:**۱۸۹–۱۹۳.

Wilby R.L.; C.W. Dawson, and E.M. Barrow. ۲۰۰۲. SDSM a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modeling & Software*, ۱۷: ۱٤۷-۱۵۹.

Wilby R.L, and C.W. Dawson. ۲۰۰۷. SDSM ٤,۲-A Decision Support Tool for the Assessment of Regional Climate Change Impacts, Version ٤,۲ User Manual. Lancaster University, UK.

Zeinivand, H. ۲۰۰۹. *Development of spatially distributed hydrological WetSpa modules for snowmelt, soil erosion and sediment transport.* PhD Thesis, Vrije University Brussel, Belgium.

Zhang,L.;W.R. Dawes, and G.R. Walker. R.۲۰۰۱.Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, **۳۷(۳)**: pp. ۷۰۱–۷۰۸.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.29252/jsaeh.7.1.9]