نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال بیست و چهارم، شماره ۷۳، تابستان ۱۴۰۳

چشم‌انداز تأثیر تغییر اقلیم آینده بر منابع آب و عملکرد چغندرقند در حوضه دریاچه ارومیه[1]

دریافت مقاله: ۹۸/۴/۳۰ **پذیرش نهایی**: ۹۸/۶/۱۱

صفحات: ۲۵-۱

سمیه نادری: دکتری آب‌وهواشناسی کشاورزی، جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
Email: std_nadery8802@khu.ac.ir

بهلول علیجانی: استاد آب‌وهواشناسی، جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
Email: alijani@khu.ac.ir

زهرا حجازی زاده: استاد آب‌وهواشناسی، جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
Email: hedjazizadeh@yahoo.com

کریم عباسپور: توسعه روش‌های آنالیز ریسک، سیام، مؤسسه تحقیقات فدرال سوئیس، دانشگاه ای تی اچ، زوریخ، سوئیس.
Email: karim.abbaspour@eawag.ch

حسن حیدری: اقلیم‌شناسی، جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
Email: ha.heidari@urmia.ac.ir

چکیده

شواهد موجود نشان می‌دهد تغییر اقلیم ثبات تولید منطقه‌ای محصولات کشاورزی را در چند دهه آینده نامطمئن خواهد ساخت. این تحقیق، با استفاده از مدل SWAT به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر هیدرولوژی و عملکرد چغندرقند به‌عنوان یکی از محصولات غالب در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه پرداخته است. در این راستا نخست مدل SWAT بر اساس رواناب ماهانه ۲۳ ایستگاه آب‌سنجی و عملکرد سالانه گیاه به‌طور هم‌زمان شبیه‌سازی‌شده سپس خروجی مدل با استفاده از الگوریتم SUFI2، در نرم‌افزار SWAT-CUP برای دوره پایه ۱۹۸۶-۲۰۱۴ مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت. مقادیر نش-ساتکلیف و آماره اریب برای رواناب در دوره واسنجی با مقادیر به ترتیب ۰/۴۳ و ۴۵٪ و در دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۵۳ و ۱۶٪ و همچنین شاخص توافق ۰/۷۱ و آماره اریب بسیار پایین (۶-٪ تا ۱۰٪) برای تولید محصول، کارایی مدل در شبیه‌سازی منابع آب و عملکرد گیاه را تأیید کرد. گام بعدی، ریزمقیاس نمایی و تصحیح خطای داده‌های دما و بارش دریافت شده از سه مدل GFDL، HadGEM2 و IPSL تحت سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 با استفاده از نرم‌افزار CCT بود. در ادامه داده‌های ریزمقیاس شده به مدل SWAT معرفی و در نهایت متغیرهای هیدرولوژی و عملکرد چغندرقند برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ ارزیابی گردید. درحالی‌که اکثر سناریوها نشان‌دهنده تغییر بارش، بین ۱۲-٪ تا ۳۵+٪ بودند، افزایش دما (۲/۷ °C)، باعث افزایش تبخیر و در نتیجه افزایش فشار بر منابع آبی و رواناب به‌ویژه در ماه های آغازین دوره رشد گیاه شده و در نهایت، کاهش عملکرد گیاه (۴۵-٪) دور از انتظار نیست. بدین معنی که عملکرد چغندرقند در برابر تغییرات اقلیمی بسیار آسیب‌پذیر بوده و تولید این محصول در منطقه موردمطالعه طی دوره آتی، دست‌خوش تغییر قرار خواهد گرفت.

واژگان کلیدی: تأثیر تغییر اقلیم، چغندرقند، حوضه دریاچه ارومیه، تحلیل حساسیت،SWAT.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

مقدمه

در نوشته‌های علمی، به تغییرات حاصل از افزایش گازهای گلخانه‌ای در اقلیم کره زمین، تغییر اقلیم[۲] اطلاق می‌گردد که در واقع بیانگر جهش‌هایی در شرایط میانگین و حدی آب و هوایی است (Easterling et al. 2000). این فرایند به دلیل ابعاد علمی و کاربردی آن (آثار محیطی، اقتصادی و اجتماعی) مهم‌ترین بحث مطرح در قلمرو علوم محیطی بوده است (Mishra and Singh, 2011)، به‌ویژه عملکرد محصولات کشاورزی که به‌شدت تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار دارد (Adams et al., 1998). گرچه این تأثیر در طول زمان و مکان متفاوت است، چنانچه آثار آن در برخی سیستم‌های کشاورزی و نواحی، مثبت و در برخی، منفی است (Bocchiola et al., 2013) و بر طبق پنجمین گزارش ارزیابی(AR5)[۳] هیئت بین‌المللی تغییر اقلیم(IPCC)[۴] آثار منفی تغییر اقلیم از آثار مثبت آن در سراسر جهان شایع‌تر است (IPCC, 2013). به‌طورکلی، با افزایش دما نیاز آبی گیاهان بیشتر شده و بهره‌برداری از منابع آب افزایش می‌یابد و کاهش عملکرد محصولات کشاورزی ممکن است منجر به کاهش امنیت غذایی در سراسر جهان گردد (Bhatt et al., 2013). باید توجه داشت که تأثیر توأم با افزایش غلظت CO_2 و دما بر عملکرد گیاهان زراعی پیچیده بوده و بسته به موقعیت جغرافیایی متفاوت می‌باشد، بنابراین درک دقیق وضعیت تولید محصولات زراعی در شرایط اقلیمی آینده مستلزم انجام مطالعات در مقیاس منطقه‌ای و ملی است (Vaghefi et al., 2014). به‌عنوان نمونه، لی[۵] و همکاران (2009) افزایش‌هایی در عملکرد ذرت در کشورهای جنوب صحرای آفریقا پیش‌بینی کردند، درحالی‌که تائو[۶] و همکاران (2009) کاهش‌هایی را در عملکرد این محصول در چین، برای دهه‌های آتی گزارش دادند. جاگارد[۷] و همکاران (2018) نیز در یافته‌های خود بیان داشتند که اگرچه CO_2 رابطه مثبتی با عملکرد گیاهان سه کربنه (C3) مانند چغندرقند دارد ولی تا سال ۲۰۵۰ با افزایش غلظت اوزون که تأثیر منفی بر رشد و عملکرد گیاهان دارد، اثر مفید CO2 بر C3 ها را خنثی کرده، باعث کاهش عملکرد گیاهان خواهد شد.

کشت چغندرقند به لحاظ شرایط اقلیمی، آب و هوایی و همچنین آشنایی کشاورزان به نحوه کاشت، داشت و برداشت از دیرباز در حوضه دریاچه ارومیه رایج بوده است و بخش‌های غربی و جنوبی آن با توجه به بارندگی بیشتر، وجود سدها و بندهای انحرافی، آب‌وهوای گرم‌تر و نیز دسترسی بیشتر به امکانات آبیاری در طول سال بیشترین عملکرد چغندرقند را دارند (وزارت نیرو، ۱۳۹۴). نیاز آبی این محصول نسبت به سایر محصولات دیگر مانند ذرت و آفتابگردان از مصرف آب برابری برخوردار بوده و از محصولاتی همچون یونجه و باغات مصرف آب کمتری دارد، درحالی‌که مواد خشک و محصول تولیدی در واحد سطح نسبت به محصولات ذکرشده، بالا بوده و همچنین در جهت ارتباط با صنعت، اشتغال‌زایی، ارزآوری و سودآوری مناسب برای کشاورزان، از اهمیت و

[2] Climate Change
[3] Fifth Assessment Report
[4] Intergovernmental Panel on Climate Change
[5] Liu
[6] Tao
[7] Jaggard

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

استقبال خوبی برخوردار است. همچنین واردات شکر که از نیازهای اساسی کشور می‌باشد، به‌واسطه کشت این محصول کمتر شده و از خروج ارز جلوگیری می‌گردد. حوضه دریاچه ارومیه به‌عنوان یکی از مناطق اصلی کشت چغندرقند طی سال‌های اخیر، به‌ویژه دو دهه گذشته، تنش‌های محیطی شدیدی را تجربه کرده و میزان رواناب رودخانه‌های آن به‌شدت کاهش یافته است (حیدری و نادری، ۱۳۹۳). مطالعات متعددی روند گرمایش جهانی در این منطقه را مورد تأیید قرار داده‌اند. همچنین پیش‌بینی‌های اقلیمی در این منطقه نشان داد، در آینده نمایه‌هایی نظیر طول دوره رویش افزایش و دامنه تغییرات شبانه‌روزی دما کاهش خواهند یافت (فتاحی و مقیمی، ۱۳۹۸). با نظر به اهمیت چغندرقند از لحاظ اقتصادی و اشتغال‌زایی در منطقه موردمطالعه، این سؤال مطرح می‌گردد که آیا تغییرات آب و هوایی و چشم‌انداز اقلیمی آینده ممکن است بر محصولی همچون چغندرقند، تأثیر منفی بگذارد.

با این آگاهی که شرایط اقلیمی به‌شدت بر مؤلفه‌های مختلف بیلان آب و تولید محصول تأثیرگذار است و برنامه‌ریزی کشاورزی بدون شناخت تأثیر اقلیم موفق نخواهد بود (کاویانی و علیجانی، ۱۳۹۰)، پیش‌بینی وضعیت اقلیمی آینده در مطالعات آثار تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات کشاورزی ضروری است. در این راستا، استفاده از مدل‌های کشاورزی-هیدرولوژی مانند ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT)[8] (Arnold et al., 2012) و سناریوهای اقلیمی که اخیراً به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان راه‌کاری کارآمد در کارهای تحقیقاتی متعددی جهت ارزیابی فرایندهای مدیریت کشاورزی برای چشم‌انداز پیچیده و شرایط مختلف آب و هوایی از جمله پیش‌بینی تأثیر اقلیم آینده در هیدرولوژی و عملکرد محصول در حوضه‌های آبخیز به کار می‌روند، به نظر انتخاب‌های قابل اتکایی هستند (Gordon et al., 2000). تحقیقات مختلف نشان می‌دهند که این مدل به دلایلی همچون قابلیت شبیه‌سازی هم‌زمان آثار متقابل متغیرهای هیدرولوژیکی (مانند رواناب، تبخیر و تعرق و آب‌های زیرزمینی) و عملکرد کشاورزی در حوضه‌های پیچیده، گزینه‌ای مناسب می‌باشد (ذهبیون و همکاران، ۱۳۸۹). بررسی آثار تغییر اقلیمی بر هیدرولوژی و عملکرد محصول در حوضه باهوانی[9] هند نشان داد که مدل SWAT می‌تواند به‌عنوان یک ابزار جهت ایجاد استراتژی‌های سازگاری با تغییرات آب و هوایی مانند تغییر روش کشت، اصلاح مدیریت آبی و کود مورداستفاده قرار گیرد (Lakshmanan et al., 2015). در تحقیق دیگری، پالازولی[10] و همکاران(2015) با استفاده از مدل SWAT تغییرات اقلیمی را بر روی منابع آبی و عملکرد گیاهان مختلف در حوضه رودخانه ایندراواتی[11] در کشور نپال ارزیابی کردند و عملکرد مناسب مدل را در مطالعات خود مورد تأیید قرار دادند. در ایران نیز نتایج مطالعه احمدآبادی و صدیقی فر (۱۳۹۷) ضمن تأیید کارایی مدل SWAT در پیش‌بینی‌های اقلیمی نشان داد کاهش بارندگی، افزایش دما و کاهش تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبریز کن در شرایط اقلیمی آینده محتمل خواهد بود. همچنین میزان رواناب سطحی در سطح حوضه موردمطالعه افزایش خواهد یافت. کارایی این مدل در پژوهش‌های مختلفی که در سطح حوضه دریاچه

[8] Soil and Water Assessment Tool
[9] Bhawani
[10] Palazzoli
[11] Indrawati

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

ارومیه انجام‌شده، نیز تأییدشده است. برای مثال رضایی زمان و همکاران (۲۰۱۵) ضمن اشاره به‌دقت بسیار خوب این مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول در حوضه دریاچه ارومیه (R^2=۰/۹۲)، کاهش عملکرد کشاورزی ۳۶ تا ۴۹ درصدی را برای چغندرقند پیش‌بینی کردند. توانایی این مدل در کار احمدزاده و همکاران (۲۰۱۶) در شبیه‌سازی تبخیر تعرق واقعی روزانه و عملکرد چند محصول عمده از جمله چغندرقند در حوضه زرینه‌رود به‌عنوان یک زیرحوضه اصلی کشاورزی در حوضه دریاچه ارومیه که بیش از ۴۰ درصد کل جریان سالانه ورودی به دریاچه ارومیه فراهم می‌آورد، نیز به اثبات رسیده است (NSE=0.95, R^2= 0.89). در تحقیق دیگری اثر تغییرات اقلیمی بر رواناب در حوضه آذرشهر چای، واقع در شرق دریاچه ارومیه، با استفاده از داده‌های مدل CanESM2 و سناریو RCP8.5 به‌عنوان ورودی به مدل SWAT، ارزیابی گردید و نتایج ضمن تأیید کارایی این مدل هیدرولوژیکی، نشان‌دهنده افزایش متوسط رواناب سالانه در این حوضه بود (گودرزی و فاتحی فر، ۱۳۹۸). بنابراین، پژوهش حاضر با توجه به قابلیت مدل SWAT در پیش‌بینی فرآیندهای غیرخطی و پیچیده نظیر رواناب، از این مدل جهت پیش‌بینی رواناب و عملکرد چغندرقند در دوره آتی استفاده کرده و در این راستا مدل CCT[12] را جهت ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل‌های گردش عمومی تحت سناریوهای مختلف بکار گرفته است.

روش تحقیق

معرفی محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه به وسعت ۵۱۸۷۶ کیلومترمربع در شمال غربی ایران بین عرض ۴۰° ۳۵′ تا ۳۰° ۳۸′ شمالی و طول ۴۴°۰۷′ تا ۵۳° ۴۷′ شرقی قرار دارد و شامل بخش‌های وسیعی از استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و قسمتی از استان کردستان می‌گردد (نادری و همکاران، ۱۳۹۸). این حوضه بسته یکی از شش حوضه آبریز اصلی ایران و بارش باران و ذوب برف، منابع عمده ورودی رواناب در آن هستند. ۱۷ رودخانه دائمی، ۱۲ رودخانه فصلی و ۳۹ مسیر سیلابی موجود در این حوضه همگی به دریاچه ارومیه تخلیه می‌گردند (Shadkam et al, 2016). از نظر منابع آب سطحی، رودخانه‌های جنوبی و غربی دریاچه ارومیه با توجه به بارش‌های بیشتر نسبت به رودخانه‌های شرقی و قسمت باریک شمالی، دارای آبدهی بیشتری هستند. موقعیت خاص جغرافیایی و داشتن وضعیت مناسب آب و هوایی، این منطقه را از توانایی بالایی برخوردار کرده است و به دلیل واقع‌شدن در عرض جغرافیایی بالا و ارتفاع زیاد، میانگین دمای سالانه آن (حدود ۱۱°C در اطراف دریاچه تا حدود ۲/۵°C در ارتفاعات سهند و سبلان متغیر است) نسبت به میانگین سالانه اکثر مناطق کشور کمتر بوده و جزء مناطق سردسیر محسوب می‌گردد (موسسه تحقیقات آب‌وخاک کشور، ۱۳۹۵). میانگین بارندگی سالانه در سطح حوضه حدود ۳۵۰ میلی‌متر است که بیشتر از پاییز تا اواسط بهار رخ می‌دهد. کشاورزی حدود ۷۹٪ از منطقه را پوشش می‌دهد که حدود ۴۰ ٪ از مساحت آن به آبیاری دسترسی دارد. کل

[12] Climate Change Toolkit

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

حجم آب موردنیاز خالص سالانه اراضی آبی موجود در این حوضه حدود ۲۲۴۵ میلیون مترمکعب می‌باشد، بدان معنی که کشاورزی در حوضه بسیار به آبیاری وابسته است (دفتر کل برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا، ۱۳۸۹).

داده‌های توپوگرافی، کاربری زمین، خاک

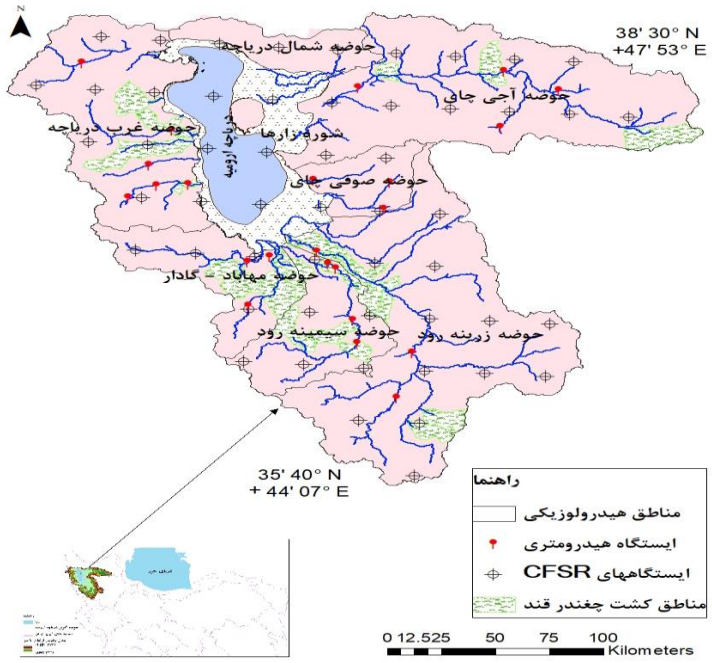
برای ساخت مدل SWAT به داده‌های توپوگرافی، هیدرولوژیکی، اقلیمی، خاک و اطلاعات مربوط به مدیریت محصول نیاز است (Faramarzi et al., 2009). داده‌های توپوگرافی از یک مدل رقومی ارتفاع (DEM) تهیه‌شده از ماهواره شاتل[۱۳] (http://www2.jpl.nasa.gov/srtm)، با وضوح ۹۰ متر، نقشه کاربری زمین براساس نقشه ۵۰۰ متری پوشش زمین توسط ماهواره مودیس[۱۴] (http://modisland. gsfc.nasa.gov/) و نقشه خاک این حوضه به همراه خواص فیزیولوژیکی- شیمیایی خاک، از نقشه جهانی خاک از پایگاه داده سازمان فائو[۱۵] (http://www.fao.org/nr/land/soils/digital-soil-map-of-the-world/en/) دریافت گردید. همچنین جهت بهبود شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان، از نقشه شبکه رودخانه‌ها در مقیاس یک کیلومتری تهیه‌شده توسط وزارت جهاد کشاورزی استفاده شد.

داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی

در این تحقیق پس از ارزیابی داده‌های سه پایگاه داده ایستگاه‌های سینوپتیک، CRU[۱۶] و CFSR[۱۷] در پروژه‌های جداگانه و اطمینان از عملکرد بهتر داده‌های CFSR در شبیه‌سازی رواناب ماهانه رودخانه، داده‌های روزانه بارش، حداقل و حداکثر دما (۲۰۱۴-۱۹۷۹) ۵۳ سایت با دقت فضایی ۳۸ کیلومتر از پایگاه بازتحلیل CFSR دریافت گردید(https://globalweather.tamu.edu). جزئیات بیشتر توسط نادری و همکاران (۱۳۹۸) ارائه شده است. داده‌های رواناب خروجی ۲۳ ایستگاه هیدرومتری واقع بر سرشاخه‌ها و رودخانه‌های اصلی که دارای آمار قابل قبولی بودند، از اداره آب منطقه‌ای دریافت شده و برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل بکار گرفته شد. کلیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای MATLAB و Excel مدیریت گردید. با توجه به تراکم پایین ایستگاه‌های اندازه‌گیری، طبق عملکرد مدل هیدرولوژیکی، لپس‌ریت دما $-6°C km^{-1}$ در نظر گرفته شد (Shakya, 2011). مدل SWAT از بارش توزیع شده در ایستگاه‌های اندازه‌گیری استفاده می‌کند. با استفاده از ایستگاه‌های بارش در دسترس، میانگین لپس‌ریت عمودی بارش سالانه ۲/۵ $mm\ km^{-1}\ d^{-1}$ به دست آمد شکل (۱).

[13] Shuttle Radar Topography Mission
[14] MODIS
[15] FAO
[16] Climatic Research Unit
[17] Climate Forecast System Reanalysis

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]



شکل(۱). پیکربندی حوضه آبریز دریاچه ارومیه

اطلاعات مدیریت محصول

جهت برآورد سطوح اراضی کشاورزی و اطلاعات مدیریت محصول شامل: تاریخ کاشت و برداشت محصول، کود و شخم در مناطق محل کشت محصول جدول (۱) و نیز داده‌های عملکرد گیاه برای دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ اقدام به جمع‌آوری آمار و اطلاعات از مرکز آمار ایران، وزارت جهاد کشاورزی و گزارش‌های دفتر کل برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا (۱۳۸۹) و مصاحبه با کارشناسان محلی گردید. پس از تعیین مکان تقریبی کشت چغندرقند، تنها زیرحوضه‌هایی که دارای کشت این محصول بودند به مدل معرفی و مورد ارزیابی قرار گرفتند.

جدول (۱). تقویم زمانی عملیات کاشت و برداشت چغندرقند بهاره در حوضه دریاچه ارومیه

تاریخ کاشت	میزان و نوع کود مصرفی (kg/ha)			تاریخ برداشت
	نیتروژن	فسفر	اوره	
۳۰ مارس	۳۰۰	۳۵۰	۱۲۰	۲۰ اکتبر

محاسبه بیلان نیاز آبی گیاه جهت معرفی برنامه‌ریزی آبیاری در حوضه به مدل SWAT

محاسبه بیلان نیاز آبی با تعیین عوامل مصرف و تأمین نیاز آبی مشخص می‌گردد. در حقیقت برای تعیین مقدار آب لازم برای آبیاری، باید باران مؤثر و رطوبت ذخیره خاک را از تبخیر تعرق پتانسیل گیاهی کسر کرد. معادله بیلان نیاز آبی گیاه به شرح رابطه (۱) می‌باشد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

$$Ir = ETc - (Re + Sm)$$ رابطه(۱)

در رابطه (۱)، ETc برابر تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه، Re برابر بارش مؤثر و Sm برابر رطوبت ذخیره در خاک در آغاز بهار است. چنانچه حاصل بیلان منفی باشد، نیاز به آبیاری نخواهد بود و چنانچه مقدار آن مثبت باشد، به همان میزان آب آبیاری لحاظ می‌گردد. در هر زیرحوضه مدل سوات آب موردنیاز آبیاری را از معادله بیلان آب رابطه (۲) محاسبه می‌کند:

$$GWR = \frac{PWR\ (NDW)}{IE\ (Water\ balance)}$$ رابطه (۲)

GWR میزان نیاز آبی خالص در یک روز ($mm\ d^{-1}$)، PWR نیاز آبی ناخالص که بر اساس سند ملی آب ایـران محاسبه‌شده، IE راندمان آب برای هر محصول در هر زیر حوضه است (طایفه رضایی، ۱۳۹۲).

به‌منظور تعیین میزان آب موردنیاز جهت برنامه‌ریزی آبیاری در آغاز، کل حوضه به ۷ زیرحوضه درجه دوم (وزارت نیرو، ۱۳۹۱) تقسیم مراجعه شود به شکل (۱) و در گام بعد، نیاز آبی خالص در هر منطقه هیدرولوژیکی بر اساس روابط (۱) و (۲) در مقیاس ده روزه به مدل معرفی شد جدول (۲). این اطلاعات براساس ارقام سند ملی آب ایران و گزارشات وزارت جهاد کشاورزی استخراج شده است. رودخانه‌های شمالی و حوضه صوفی چای به دلیل نبود اطلاعات کافی مرتبط با کشت چغندرقند ارزیابی نگردید.

جدول (۲). نیاز آبی خالص در هر منطقه هیدرولوژیکی در مقیاس ده روزه

منطقه هیدرولوژیکی	غرب دریاچه	زرینه‌رود	سیمینه‌رود	آجی چای	مهاباد و گادار چای	سوفی چای	شمال دریاچه
نیاز آبی خالص (میلی‌متر)	65	77	69	60	68	-	-

مدل سوات

SWAT، یک مدل پیوسته زمانی، فیزیکی و نیمه توزیعی است که توسط مرکز تحقیقات کشاورزی ایالات‌متحده برای پیش‌بینی اثر تغییر کاربری، تغییر اقلیم و مدیریت در حوضه‌های آبخیز بزرگ و پیچیده طراحی‌شده است (Verbeeten and Barendregt, 2007). در این مدل به‌جای استفاده از معادلات رگرسیونی برای توصیف رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی، از اطلاعات ویژه مربوط به هوا، توپوگرافی، خاک، پوشش گیاهی و پوشش اراضی در حوضه آبخیز استفاده می‌کند. هر حوضه، با توجه به توپوگرافی، به تعدادی زیر حوضه متصل به یک شبکه رودخانه تقسیم می‌گردد. در ادامه هر زیر حوضه به چند واحد هیدرولوژیکی همگن(HRU)[18] تقسیم می‌شود که این واحدهای هیدرولوژیکی نمایانگر مناطقی با پوشش زمین، ترکیبات خاک، شیب و مدیریت منحصربه‌فرد و یکسان هستند. این مدل بودجه آب و نیز عملکرد محصول در HRU ها

[18] Hydrologic Response Unit

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

در حوضه رودخانه را پیش‌بینی می‌کند. مؤلفه رشد گیاه در SWAT یک نسخه ساده از مدل اپیک[19] است (Cabelguenne et al., 1990; Izaurralde et al., 2006). در EPIC، توسعه گیاه بر پایه واحدهای تجمعی حرارتی است که با استفاده از روش مونتیته[20] و موس[21] (۱۹۷۷) بر وزن بالقوه زیست‌توده (بیوماس) می‌باشد. برای محاسبه عملکرد گیاه از شاخص برداشت استفاده می‌شود و رشد گیاه را می‌توان با حرارت، تنش آبی، نیتروژن و فسفر محدود کرد(Stöckle and Nelson, 1999) . رشد بالقوه گیاه در شرایط ایده‌آل عرضه آب و مواد مغذی برای هر روز شبیه‌سازی، محاسبه شده و رشد واقعی با تنش آب و مواد مغذی و دما محدود می‌گردد (Palazzoli, Maskey, Uhlenbrook, Nana, & Bocchiola, 2015). در این مطالعه تعداد کل ۱۸۱ زیر حوضه در حوضه دریاچه ارومیه شناسایی و سپس در هر زیرحوزه تعداد با فرض مقادیر غالب (Dominant)خاک، شیب و کاربری اراضی آن مشخص گردید (HRU). روش سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) که به روش شماره منحنی (CN) معروف است، جهت پیش‌بینی رواناب رودخانه و روش هارگریوز[22] (Hargreaves, 1985)، جهت پیش‌بینی تبخیر و تعرق مورداستفاده قرار گرفت. برای محصول، برنامه مدیریتی به مدل معرفی شد، یعنی عملیات کاشت، داشت و برداشت. در ادامه پنج باند ارتفاعی جهت تطبیق دما و بارش بر اساس ارتفاع زیرحوضه‌ها تعیین شد (بین ۱۳۰۰ تا ۳۵۰۰ متری). SWAT با استفاده از روش ارائه شده توسط استاکل[23] و همکاران (۱۹۹۲)، اثر CO_2 را بر تولید زیست‌توده یا بیوماس محصول تقریباً با غلظتی در محدوده ۳۳۰ ppm تا ۶۶۰ ppm محاسبه می‌کند. با توجه به وب‌سایت پایگاه داده RCP (Version 2.0.5)، این مقدار برای شبیه‌سازی دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ مربوط به RCP4.5، ۴۸۰ ppm و RCP8.5، ۶۰۰ ppm به مدل معرفی گردید (IPCC, 2014). سه سال اول به‌عنوان دوره آموزش یا گرم‌کننده جهت متعادل کردن شرایط اولیه مدل در نظر گرفته شد.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

جهت اطمینان از عملکرد SWAT و بسط آن برای شرایط آتی، لازم است که مدل در شرایط کنونی واسنجی شود. در واسنجی جریان هیدرولوژیکی با داشتن اطلاعات ایستگاهی در بالادست، مصارف پایین‌دست، تخمین آب برگشتی و رواناب‌های حوضه میانی، میزان رواناب مورد انتظار در ایستگاه پایین‌دست محاسبه‌شده و سپس با رواناب مشاهداتی ایستگاه اندازه‌گیری مقایسه و در صورت اختلاف قابل‌توجه، بررسی مجدد و یا تغییر ضرایب صورت می‌گیرد (Abbaspour, 2015). ازآنجاکه طول سال‌های آماری داده‌های در دسترس برای هر ایستگاه هیدرومتری متفاوت بود، با استفاده از بسته SWAT-CUP نسخه ۲ الگوریتم SUFI-2، دو سوم آمار رواناب ماهانه ایستگاه‌های هیدرومتری (به‌طور تقریبی برای سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۴) و یک‌سوم آمار ماهانه ایستگاه‌های هیدرومتری (به‌طور تقریبی برای سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴) به‌طور هم‌زمان در بخش‌های

[19] the Environmental Policy Integrated Climate (EPIC)
[20] Monteith
[21] Moss
[22] Hargreaves
[23] Stockle

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

هیدرولوژیکی و کشاورزی به ترتیب، واسنجی و اعتبارسنجی گردید. SWAT-CUP یک برنامه بهینه‌ساز ارتباط‌دهنده است که با استفاده از آن واسنجی و عدم قطعیت در ارتباط با SWAT به‌راحتی انجام‌پذیر است (Abbaspour, 2015). پارامترهای برف و ارتفاع به دلیل مسائل مربوط به توانایی تشخیص مدل، کالیبره شده و مقادیر آن‌ها به بهترین مقدار به‌دست‌آمده برای این پارامترها تنظیم گردید (Abbaspour et al., 2018). سپس رواناب ماهانه و در نهایت عملکرد چغندرقند و پارامترهای مرتبط با آن مورد واسنجی قرار گرفتند. در این مرحله مقادیر پارامترها، به روشی هدفمند، آن‌قدر تغییر داده می‌شود که عملکرد محصول شبیه‌سازی‌شده تا حد مطلوب به عملکرد محصول مشاهداتی در قالب استانی نزدیک شود. توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوضه به کمک پارامترهای P-factor، R-factor، ضریب نش ساتکلیف[۲۴] (NSE) و ضریب اریب (PBIAS) ارزیابی شد (احمدآبادای و همکاران، ۱۳۹۶). همچنین شاخص توافق ویلموت[۲۵] (IA) (Willmott, 1981) برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی محصول مورداستفاده قرار گرفت. چنانچه مقادیر NSE> 0.50، (Salas et al., 2018) PBIAS ± 25٪ و IA به یک نزدیک‌تر باشد، نتایج شبیه‌سازی رضایت‌بخش خواهد بود (معصوم پور و همکاران، ۱۳۹۶).

شبیه‌سازی آینده براساس شرایط موجود

در مطالعات تأثیر تغییر اقلیم از روش‌های مختلفی برای تولید سناریوی اقلیمی در دوره‌های آتی استفاده می‌گردد که در حال حاضر معتبرترین وسیله، مدل‌های سه‌بعدی جفت شده اقیانوس-جو گردش عمومی جو است (AOGCM) که ابزاری معتبر برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیم و تهیه ورودی مدل‌های هیدرولوژیکی می‌باشد (Wilby and Harris, 2006) و سناریوهای هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) در حال حاضر مطمئن‌ترین روش در ارزیابی تغییرات اقلیمی هستند به‌ویژه در مقیاس حوضه آبخیز (Allen Consulting Group, 2014). با توجه به اینکه استفاده از چند پیش‌بینی آب و هوایی و سناریوی انتشار امکان مطالعه پارامترهای مختلف فراهم آورده و خطای مدل را کاهش می‌دهد (Wang et al., 2018)، در این راستا پس از واسنجی مدل، وضعیت منابع آبی و عملکرد محصول برای یک دوره درازمدت در آینده با پیش‌فرض ادامه شرایط کنونی، با استفاده خروجی سه مدل گردش عمومی جو جدول (۳) زیرمجموعه پنجمین گزارش ارزیابی (AR5) دریافت شده از ایزی میپ(ISI-MIP)[۲۶] شبیه‌سازی و موردبررسی قرار گرفت. این پروژه در سال ۲۰۱۳ به‌عنوان یک تلاش جامع، جهت پیش‌بینی تأثیر تغییر اقلیم در سطوح مختلف گرمایش جهانی آغاز به کار کرد (Hempel et al., 2013). در این تحقیق از سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 استفاده‌شده است.

[24] Nash and Sutcliffe
[25] Willmott's index of agreement
[26] The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

جدول (۳). شرح سه مدل GCM از گزارش پنجم IPCC (AR5)

مدل ISI-MIP	توسعه‌دهنده
*GFDL-ESM2M	NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Center
IPSL-CM5A-LR	L'Institute Pierre-Simon Laplace(France)

* GCM ها طی دوره ۱۹۶۰ تا ۲۰۹۹، در دسترس هستند.

IPSL-CM5A-LR= S3 ،HadGEM2-ES= S2 ،GFDL-ESM2M= S1

ریزمقیاس نمایی

با وجود آنکه GCM ها امروزه منبع استاندارد داده‌های آب‌وهوایی در دوره آتی هستند، ولی خروجی این مدل‌ها به دلیل بزرگ بودن مقیاس مکانی دارای خطاهای بزرگی است که اگر تصحیح نگردند، می‌توانند خطاهای قابل‌توجهی در ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم در مقیاس محلی پدید آورند. روش‌های گوناگونی برای ریزمقیاس نمایی داده‌های GCM وجود دارد که روش‌های آماری مناسب‌ترین آن‌ها بخصوص برای کشور ایران می‌باشند (مساح بوانی و هراتیان عرب،۱۳۹۰). در این تحقیق با استفاده از جعبه‌ابزار تغییرات اقلیمی(CCT)، خروجی GCM ها برای رسیدن به نتایج بهتر و قابل معتبرتر بر اساس نزدیک‌ترین ایستگاه‌های مشاهداتی در حوضه دریاچه ارومیه، ریزمقیاس و تصحیح شد. ابزار CCT از عامل تصحیح ضربی (Multiplicative correction) برای تصحیح داده‌های بارندگی و عامل تصحیح جمعی (Additive correction) برای تصحیح داده‌های دما استفاده می‌کند. عامل‌های تصحیح ضربی و جمعی طبق روابط (۴ و ۵) محاسبه می‌شوند:

$$P_{Corrected_{ij}} = P_{GCM_{ij}} \times \frac{P_{reference_{ik}}}{P_{GCM_{ik}}}$$ رابطه (۴)

P و $\bar{P}$ به ترتیب نشان‌دهنده بارش روزانه (میلی‌متر بر روز) و متوسط بلندمدت بارش هستند. عامل تصحیح جمعی با توجه به رابطه (۵) محاسبه می‌گردد:

$$T_{Corrected_{ij}} = T_{GCM_{ij}} + (\bar{T}_{reference_{ik}} - \bar{T}_{GCM_{ik}})$$ رابطه(۵)

T و $\bar{T}$ به ترتیب نشان‌دهنده دما و متوسط دمای بلندمدت هستند و i، j و k به ترتیب نمایانگر روز، ماه و سال هستند (Vaghefi et al., 2017). برای مطالعه بیشتر درباره این مدل مراجعه شود به نادری و همکاران (۱۳۹۸). در نهایت داده‌های بارندگی، حداقل و حداکثر دمای روزانه برای آینده تولید، سپس به مدل SWAT معرفی گردید و تغییرات رواناب و عملکرد چغندرقند در حوضه دریاچه ارومیه در دوره آتی شبیه‌سازی شد. در این مرحله فرض شد درصورتی‌که سری زمانی آماری برای یک دوره دیگر و با توجه به شرایط موجود بهره‌برداری انجام پذیرد چه تغییراتی در وضعیت منابع آبی و عملکرد چغندرقند در حوضه دریاچه ارومیه به وقوع خواهد پیوست.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

نتایج

جریان‌های هیدرولوژیکی حاصل شبیه‌سازی مدل SWAT

با توجه به وضعیت منطقه موردمطالعه، پس از واسنجی پارامترهای ارتفاعی و برف جدول (۴)، ۳۲ پارامتر که تأثیر بیشتری در رواناب و عملکرد گیاهی در حوضه با توجه به جریان پایین‌دست و بالادست در زیرحوضه‌های مرتبط دارند، جهت واسنجی مدل انتخاب شدند. این پارامترها با توجه به تحقیقات قبلی در زمینه واسنجی مدل SWAT انتخاب شده‌اند (White and Chaubey, 2005). سپس، واسنجی تا رسیدن به دامنه مطلوب، ۷۲۰ بار اجرا گردید. قابل‌توجه است که واسنجی مدل با ۹۵ درصد اطمینان (95PPU) در یک محدوده برای پارامترها انجام شده است. چراکه اگر تنها یک مقدار بهینه برای هر پارامتر در تجزیه‌وتحلیل وارد شود، در واقع فرض کرده‌ایم که واسنجی مدل تنها یک راه‌حل و پاسخ دارد که درست نیست و تنها یک مقدار ثابت پارامتر نمی‌تواند نماینده حوضه باشد (Abbaspour et al., 2014). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده جدول (۵)، ضریب مانینگ آبراهه اصلی (CH_N2) و ضریب عکس‌العمل جریان آب زیرزمینی (ALPHA_BNK) پارامترهایی بودند که اثر بیشتری بر رواناب حوضه داشتند. واحد تجمع حرارتی (HEAT_UNIT) و حداکثر هدایت روزنه‌ای (GSI) دو پارامتر بسیار تأثیرگذار در عملکرد چغندرقند بودند.

جدول (۴). پارامترهایی که جداگانه تنظیم‌شده‌اند

	پارامتر	شرح	حداقل مقدار	حداکثر مقدار
باندهای ارتفاعی	LAPS-T	لپس‌ریت دما (°C)	-8	- 4
	LAPS-P	لپس‌ریت بارندگی (°C)	5	30
فرایندهای برف	SFTMP	دمای بارش برف (°C)	-5	0
	SMTMP	دمای ذوب برف (°C)	-5	0
	SMFMX	حداکثر نرخ ذوب برف در طول سال (mm/C°-day)	0	5
	SMFMN	حداقل نرخ ذوب برف در طول سال (mm/C°-day)	0	5

جدول (۵). نتایج تحلیل حساسیت مدل و بهینه‌سازی پارامترها

	پارامتر	t-stat*	P-Value**	محدوده نهایی
رواناب	A__CH_N2.rte***	-1.98	0.05	(-0.013)_0.162
	V__ALPHA_BNK.rte	1.69	0.12	0.523_0.88
	R__CN2.mgt	1.68	0.12	0.041_0.234
	R__SOL_K.sol	1.6	0.14	(-0.393)_(-0.08)
	R__REVAPMN.gw	1.54	0.15	(-1.468)_(-0.506)
	V__ESCO.hru	-0.99	0.34	0.674_0.891
	V__GW_REVAP.gw	-0.88	0.4	0.096_0.181
	A__OV_N.hru	-0.69	0.51	(-0.022)_0.072
	R__SOL_BD.sol	-0.56	0.59	0.130_0.522
	V__CH_K2.rte	0.41	0.69	49.108_102.971
	R__GWQMN.gw	0.41	0.69	(-0.169)_0.334
	R__SOL_AWC.sol	0.19	0.85	(-0.092)_0.088

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

15_18	0	-7.34	V__T_BASE.plant.dat	عملکرد محصول
0.86_0.953	0	3.4	V__DLAI.plant.dat	
2000_2300	0.06	1.46	V__ HEAT_UNITS.mgt	
4_6	0.29	-1.08	V__GSI.plant.dat	
1.99_2.399	0.36	0.95	V__HI_TARG.mgt	
0.165_0.214	0.37	0.92	V__LAIMX1.plant.dat	
0.874_1.291	0.41	-0.84	V__BIO_LEAF.plant.dat	
33_39	0.43	0.81	V__T_OPT.plant.dat	
0.906_1.090	0.48	0.72	V__AUTO_WSTRS.mgt	
0.855_0.967	0.52	-0.65	V__LAIMX2.plant.dat	
0.158_0.253	0.54	-0.62	V__FRGRW1.plant.dat	
0.893_1.298	0.6	-0.54	V__HVSTI.plant.dat	
0.463_0.554	0.67	-0.43	V__FRGRW2.plant.dat	
45_54	0.69	0.4	V__EXT_COEF.plant.dat	
6_7	0.71	0.37	V__BLAI.plant.dat	
0.733_0.968	0.73	0.36	V__AUTO_NSTRS.mgt	
73.801_81.407	0.8	0.25	V__BIO_E.plant.dat	

* حساسیت پارامتری را نشان می‌دهد. مقادیر آن هرچه بزرگ‌تر پارامتر حساس‌تر است. **P-Value معنی‌داری t-stat را نشان می‌دهد. مقادیر P-Value کوچک‌تر احتمال تصادفی بودن حساسیت پارامتر را کاهش می‌دهد. ***V نشان می‌دهد که مقدار پارامتر موجود با یک مقدار معین جایگزین می‌گردد، R یعنی مقدار پارامتر موجود چند برابر شده است و A نشان‌دهنده مقدار داده شده اضافه شده به مقدار پارامتر موجود می‌باشد.

پس از انجام تحلیل حساسیت، مدل SWAT با استفاده از داده‌های رواناب ایستگاه‌های هیدرومتری و عملکرد محصول مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت جدول (۶). دو شاخص برای اندازه‌گیری صحت عملکرد/عدم قطعیت استفاده می‌گردد، P-factor (P-factor → 1) که درصد داده‌های شبیه‌سازی‌شده که در محدوده 95PPU قرار دارند را نشان می‌دهد (حداکثر مقدار ۱۰۰٪) و R-factor (R-factor → 0). جزئیات بیشتر توسط عباسپور ارائه‌شده است (Abbaspour et al., 2007). به‌طورکلی P-factor از ۰/۲۷ تا ۰/۵ در دوره واسنجی و از ۰/۳۱ تا ۰/۶۲ در دوره اعتبار سنجی متغیر است. R-factor که هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان از توان مدل دارد، بین ۱/۸۲ تا ۲/۵ طی دوره واسنجی و از ۱/۷ تا ۲/۱ طی دوره اعتبار سنجی در مناطق هیدرولوژی مختلف بود. همچنین، دامنه مقادیر ضریب نش-ساتکلیف بین ۰/۱۴ تا ۰/۷ قرار دارد و نیمی از ایستگاه‌ها آماره اریب کمتر از ۲۵٪ داشتند که اغلب در مناطق هیدرولوژیکی غرب و جنوب غرب حوضه قرار دارند. این نتایج نمایانگر موفقیت نسبی مدل در شبیه‌سازی جریان ماهانه رودخانه در حوضه دریاچه ارومیه می‌باشد. مدل به دلایلی نتوانست پیک رواناب را در برخی مناطق به‌طور مناسبی شبیه‌سازی کند که احتمال دارد به اطلاعات ناقص مخازن و سدها در حوضه دریاچه ارومیه مربوط باشد و یا به دلیل آن باشد که تمام فرایندهایی که در شبیه‌سازی محصول حیاتی هستند، در مدل ارزیابی مورد ارزیابی قرار نگرفتند. همچنین شیوه‌های مدیریتی مختلف می‌تواند باعث خطای مدل گردد، به‌عنوان‌مثال، عملیات شخم‌زنی، تاریخ برداشت، آبیاری مکمل که در ایران برای افزایش عملکرد محصول مورداستفاده قرار می‌گیرند. در اینجا به نظر می‌رسد دلیل این مسئله داده‌های بارش باشد. گرچه از نظر روش‌شناسی این مسئله خیلی تأثیرگذار نیست، زیرا در این مطالعه ما تنها به یک شاخص میانگین بلندمدت سالانه رواناب و عملکرد گیاه نیاز داریم.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

جدول (۶). نتایج واسنجی و اعتبار سنجی مدل برای مناطق هیدرولوژیک دارای کشت چغندرقند در دوره آماری مربوط

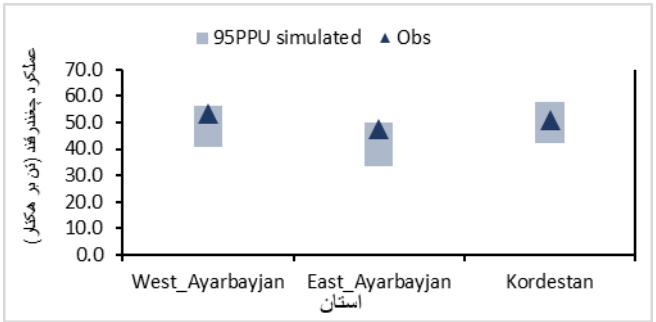
دوره	واسنجی				اعتبارسنجی			
منطقه هیدرولوژیکی	P-factor	R-factor	NSE	PBIAS [%]	P-factor	R-factor	NSE	PBIAS [%]
غرب دریاچه	0.49	2.59	0.490	-25	0.48	2.13	0.456	21
زرینه‌رود	0.27	2.51	0.685	18	0.31	2.01	0.570	37
سیمینه‌رود	0.45	2.87	0.437	76	0.53	2.09	0.144	72
مهاباد و گادار چای	0.46	2.86	0.585	2	0.62	2.06	0.435	41
آجی چای	0.4	1.82	0.431	11	0.5	1.76	0.475	57

شبیه‌سازی عملکرد محصول

در آغاز، عملکرد محصول برای زیرحوضه‌هایی که زیر کشت چغندرقند بودند، شبیه‌سازی و در گام بعد، نتایج شبیه‌سازی‌شده در مدل SWAT به‌منظور ارزیابی بهتر و مقایسه با مقادیر مشاهداتی عملکرد محصول طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴، به مقیاس استانی تطبیق داده شد. در شکل (۲) عملکرد محصولات شبیه‌سازی‌شده در دامنه ۹۵ فاصله اطمینان با متوسط عملکرد مشاهداتی هر محصول در مقیاس سالانه PPU برای هر استان نمایش داده‌شده است. به‌طورکلی نتایج حاکی از آن است که عملکرد گیاه شبیه‌سازی‌شده با عملکرد مشاهداتی در داخل یا کاملاً نزدیک به نوارهای پیش‌بینی عملکرد قرار دارند. بر اساس تجزیه‌وتحلیل فوق، SWAT، به‌طورکلی، در اکثر زیرحوزه‌ها به‌خوبی می‌تواند میانگین بلندمدت عملکرد محصول را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. متوسط تولید محصولات شبیه‌سازی‌شده توسط SWAT، با آمارهای گزارش‌شده توسط جهاد کشاورزی با یک انحراف ناچیز (PBIAS < ۲۰٪) مشابه است جدول (۷).

جدول (۷). نتایج ضرایب ارزیابی برای پارامترهای انتخاب‌شده برای عملکرد محصول

استان	PBIAS [%]	Willmott index [IA]
آذربایجان شرقی	-4%	0.76
آذربایجان غربی	-6%	0.78
کردستان	10%	0.59

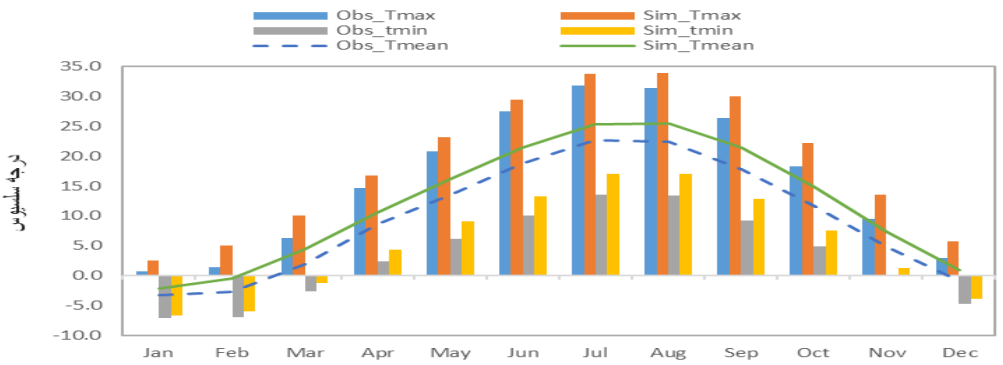


شکل (۲). مقایسه میانگین عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی چغندرقند در مقیاس سالانه (۲۰۱۴-۲۰۰۵) با ۹۵PPU

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

وضعیت دمایی منطقه در دوره آتی

جهت بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی در منطقه موردمطالعه، مدل SWAT با استفاده از خروجی داده‌های GCM ریزمقیاس و تصحیح‌شده و با استفاده از محدوده بهینه پارامترهای حاصل از اجرای نهایی مدل سوات در دوره پایه و با توجه به غلظت CO_2 جو که بر اساس چشم‌انداز هر دو سناریوی انتشار به مدل سوات معرفی شد، به‌صورت جداگانه برای دوره آینده مجدداً اجرا گردید (۷۲۰ بار اجرای مدل در ۶ پروژه شبیه‌سازی جداگانه). متوسط بلندمدت ماهانه دمای میانگین منطقه طی دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۴ با متوسط افزایش حدود °C ۲/۵، در همه ماه‌ها افزایش یافت، به‌ویژه در ماه‌های گرم سال (ماه‌های ژوئیه تا اکتبر) که دوره رشد چغندرقند بهاره است و بیشترین افزایش در ماه سپتامبر (°C ۳/۶+) یعنی اوج مرحله رشد و قندی شدن محصول، رخ داد. دمای حداکثر با میانگین افزایش تقریباً ۳ درجه سلسیوس، بیشترین آنومالی را در میان متغیرهای دمایی داشت. در مقایسه فصلی، نیمه سرد سال به‌ویژه فصل پاییز با افزایش دمای حداکثر حدود ۳/۶ درجه سلسیوس بیشترین آنومالی را داشت. دمای حداقل حاکی از افزایش شدید این متغیر اقلیمی در فصل رشد گیاه، یعنی از ژوئن تا سپتامبر بود که در تمام این ماه‌ها افزایشی بیش از °C ۳ را نشان می‌داد و کمترین افزایش با میانگین ۰/۹ درجه سلسیوس در زمستان اتفاق افتاد شکل (۳).



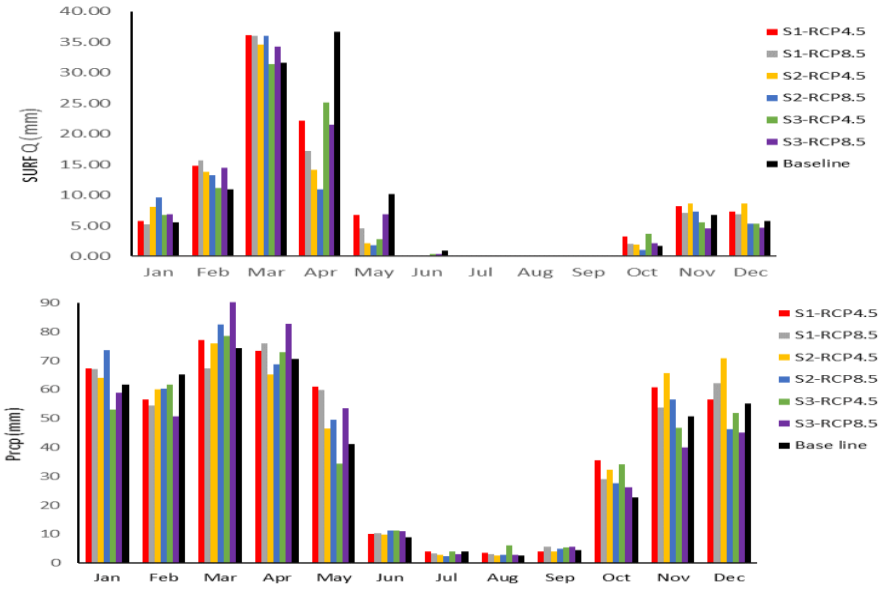
شکل (۳). متوسط ماهانه دمای میانگین(Tmean)، حداقل (Tmin) و حداکثر (Tmax) در دوره ۲۰۱۵-۱۹۸۹ (Obs)و (Sim) ۲۰۵۰-۲۰۲۴

شرایط بارندگی و هیدرولوژی منطقه در دوره آتی

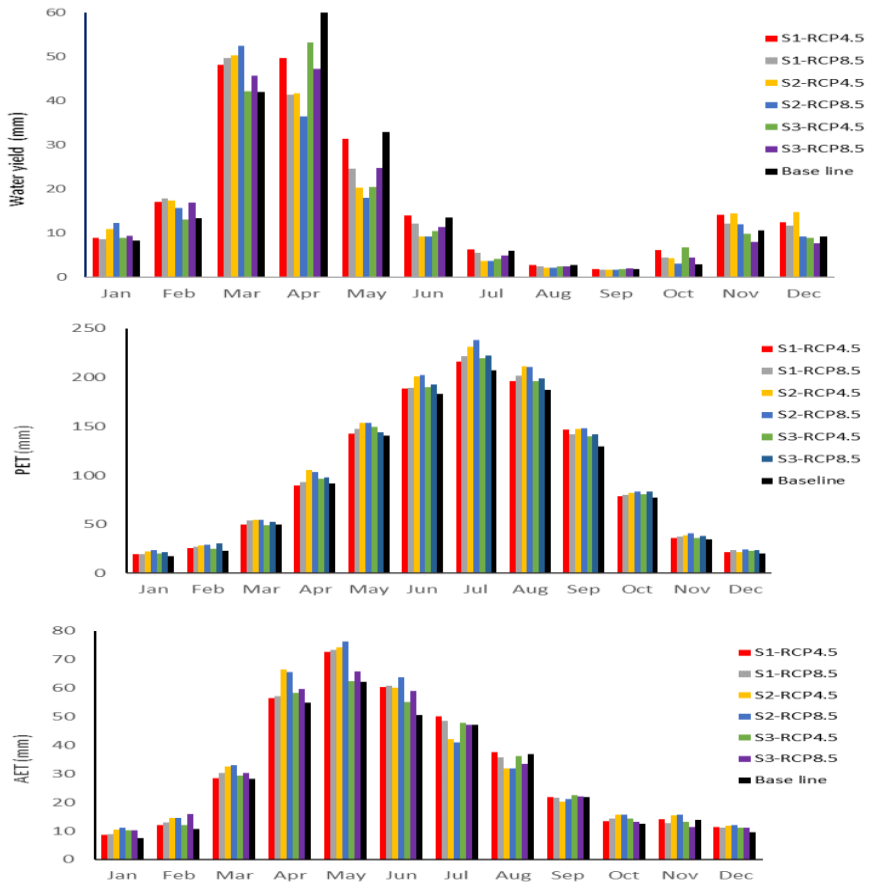
بیشتر سناریوهای اقلیمی برای دوره آینده، بارش ماهانه (Prcp) بیشتری نسبت به دوره پایه پیش‌بینی کردند و به‌طور میانگین حدود ۱۰٪ افزایش در این متغیر دیده شد شکل (۴). تمامی سناریوها روند افزایشی بارش را در ماه‌های ژوئن و اکتبر پیش‌بینی کردند و بیشترین روند افزایشی در ماه اکتبر و در مدل S1 تحت سناریو انتشار RCP4.5، مشاهده گردید (حدود ۳۶ درصد افزایش). مقایسه فصلی نیز حاکی از کاهش بارش در ماه فوریه بود (۱۲-٪). بارش در فصل پاییز روند افزایش ۱۵ درصدی نشان داد و در فصل‌های بهار و تابستان تغییر چندانی در مقادیر میانگین بارش مشاهده نشد. در ماه‌های آوریل و می (ماه‌های آغازین دوره رشد گیاه)، رواناب ماهانه (Surf Q) روند کاهشی قابل‌ملاحظه‌ای نشان داد (حدود ۵۰-٪) که با توجه به کاهش بارش در فوریه چندان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

دور از انتظار نبود. روند تغییرات رواناب در ماه‌های تابستانی و پائیزی دقیقاً مطابق با روند تغییرات بارش بود طوری که افزایش ۱۵ درصدی رواناب در ماه‌های پاییزی مطابق با افزایش ۱۴ درصدی بارش در این ماه‌ها بود و کاهش‌های رواناب شبیه‌سازی‌شده در مدل S3 مطابق با کاهش‌های بارش در ماه‌های نوامبر و دسامبر بود و در فصل تابستان هر دو متغیر بارش و رواناب تغییر خاصی نداشتند. شاخص موردبررسی دیگر در این مطالعه، عملکرد آب بود. این شاخص در ماه‌های سرد سال (پاییز و زمستان) روند افزایشی حدود ۲۵ درصدی (دامنه افزایشی بین ۱۱٪ در ماه نوامبر تا ۶۲ ٪ در ماه اکتبر) و در ماه‌های گرم سال یا همان فصل رشد گیاه یعنی از آوریل تا سپتامبر روند کاهشی به‌طور میانگین ۲۰ درصدی (دامنه کاهشی بین ۶٪ در ماه سپتامبر تا ۳۰ ٪ در ماه می) داشت که به‌غیراز مدل S1 تحت سناریو RCP4.5، تمامی مدل‌ها روند کاهشی در ماه‌های گرم سال (آوریل تا سپتامبر) پیش‌بینی کردند و مدل S2 تحت هر دو سناریو بالاترین روند منفی را در تمامی دوره گرم سال نشان داد. همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌گردد، همه مدل‌ها روند افزایش حدود ۱۰ درصدی را در مقادیر تبخیر و تعرق بالقوه (PET) و واقعی (AET) پیش‌بینی کردند. بیشترین افزایش‌ها در هر دو متغیر AET و PET در مدل S2 به دست آمد (با روند افزایشی در متغیرهای دمای حداقل و حداکثر کاملاً مطابقت دارد). در ماه‌های آگوست و سپتامبر روند کاهشی در AET در اکثر مدل‌ها دیده شد که مقدار این افزایش بسیار ناچیز و قابل‌چشم‌پوشی است (حدود ۱ الی ۲ درصد کاهش) و به‌طورکلی انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ میانگین AET سالانه در کل حوضه حدود ۵ الی ۱۳ درصد بیشتر شود.



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]



شکل (۴). متوسط ماهانه شاخص‌های بیلان آب در حوضه دریاچه ارومیه برای دوره پایه و آینده.

تأثیر بر عملکرد محصول

همان‌گونه که انتظار می‌رفت، تغییرات درجه حرارت، بارش و غلظت CO_2 در سناریوهای اقلیمی، تغییراتی در عملکرد محصولات کشاورزی پدید آورد. مقادیر حاصل از هر شبیه‌سازی با استفاده از خروجی GCM ها تحت سناریوهای انتشار موردبررسی در جدول (۸) ارائه‌شده است. کلیه شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده روند کاهشی قابل‌توجهی در عملکرد چغندرقند برای آینده هستند به‌ویژه در سال‌های انتهایی دوره موردبررسی (منتهی به ۲۰۵۰). به‌طور متوسط حدود ۴۵ درصد کاهش در عملکرد محصول با دامنه‌ای بین ۲۱-٪ در S1 (در سناریو RCP4.5) و ۶۳-٪ در S2 (تحت سناریو RCP8.5) مشاهده شد و بیشترین روند منفی (به‌طور میانگین ۴۸/۳-٪) مربوط به آذربایجان غربی بود. ذکر این نکته ضروری است که در اینجا، تأثیر تغییر اقلیم بر قابلیت دسترسی به آب موردنیاز آبیاری را بررسی نشده است، با این فرض که نیاز آبی محصول می‌تواند به‌طور کامل توسط منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در حوضه کاملاً فراهم گردد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

جدول (۸). متوسط عملکرد استانی چغندرقند تحت سناریوهای تغییر اقلیم در مقیاس سالانه (تن در هکتار)

RCPs							
8.5 (2024-2050)			4.5 (2024-2050)			330	CO_2 (ppm) / استان
600			480				
S3	S2	S1	S3	S2	S1	دوره پایه	
18.3	16.3	19.5	28	24.9	30.3	44.3	آذربایجان شرقی
-58.8	-63.2	-56.1	-36.7	-43.7	-31.6	Δ(%)	
21.2	20	22.5	34.6	31.5	36.7	50.8	آذربایجان غربی
-58.3	-60.6	-55.8	-31.8	-38	-27.8	Δ(%)	
21.8	19.8	23.3	35.7	32.4	38.4	48.5	کردستان
-55.1	-59.1	-51.9	-29.3	-33.2	-20.8	Δ(%)	

بحث

عملکرد مدل SWAT

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که میانگین عملکرد استانی محصول شبیه‌سازی‌شده با عملکرد داده‌های مشاهداتی در دوره پایه تطابق بسیار خوبی نشان داد. به‌رغم وجود اختلاف ناچیز و عدم سطح اطمینان مورد انتظار برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی در برخی ایستگاه‌ها، ازآنجاکه این ایستگاه‌ها در مناطقی واقع‌شده‌اند که سطح زیر کشت چغندرقند پایینی دارند، فرض بر این است که استفاده از مدل واسنجی شده در دوره پایه برای شبیه‌سازی دوره آینده مناسب بوده و نشان‌دهنده توانایی مدل SWAT با کمک سناریوهای انتشار و GCM ها، برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و کشاورزی طی دوره آینده است.

سناریوهای اقلیمی و بیلان آب

جهت مدیریت بهتر منابع آب و تولید کشاورزی طی سال‌های پیش رو، این پژوهش با نگاهی جامع به منابع آبی به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی را بر مؤلفه‌های مختلف بیلان آب و عملکرد محصول پرداخت. نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل نشان می‌دهد که پارامترهای دمایی از عملکرد بهتری نسبت به بارش برخوردار بوده و نوسان‌های دما بین مدل‌ها و RCP ها نقش کلیدی در تعیین الگوی محصول ایفا می‌کنند. مقادیر دمای حداقل و حداکثر طی دوره آتی افزایش یافت و بیشترین افزایش دمای حداقل در تابستان که دوره رشد چغندرقند محسوب می‌گردد، روی خواهد داد. بیشتر سناریوهای اقلیمی برای دوره آینده، بارش ماهانه بیشتری نسبت به دوره پایه پیش‌بینی کردند هرچند مقدار این افزایش‌ها بسیار کم بود و بیشترین افزایش بارش‌ها در ماه اکتبر و در مناطق جنوبی (زیرحوضه‌های زرینه‌رود و سیمینه‌رود) مشاهده شد. در ماه‌های آغازین دوره رشد گیاه (آوریل و می)، تقریباً تمام GCM ها کاهش رواناب را پیش‌بینی کردند. به‌طور تقریبی بر اساس نتایج بیشتر مدل‌های اقلیمی، در دوره آینده روند تغییرات رواناب، روند تغییرات بارش را دنبال می‌کند. روند تغییرات رواناب در پائیز دقیقاً مطابق با روند تغییرات بارش در تمام ماه‌ها خواهد بود. فصل تابستان برای هر دو متغیر بارش و رواناب تغییر خاصی مشاهده نشد. عملکرد آب که دسترسی به منابع آب در یک حوضه را نشان می‌دهد(Sun et al., 2006)، در ماه‌های سرد سال روند افزایشی را تجربه کرد به‌ویژه در اکتبر که با افزایش

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

بارش این ماه کاملاً مطابقت دارد ولی در ماه‌های گرم سال یعنی فصل رشد گیاه، روند کاهشی نشان داد که گویای آن است که تا اواسط قرن ۲۱ منابع آب جهت تأمین آب موردنیاز محصولات کشاورزی بهاره با نیاز بالای آب، کافی نخواهد بود و می‌تواند باعث کاهش عملکرد محصول در دوره آتی گردد. کاهش در شاخص‌هایی مانند رواناب در فصل رشد و عملکرد آب گویای یک مشکل بزرگ در حوضه دریاچه ارومیه هستند، منطقه‌ای که در حال حاضر فشار بر منابع آبی در آن بسیار شدید است. همه مدل‌ها روند افزایشی را در مقادیر تبخیر و تعرق بالقوه و واقعی پیش‌بینی کردند (حدود ۱۰٪ در مقیاس سالانه). نتایج حاصل از این پژوهش با یافته‌های رضایی زمان و همکاران (۲۰۱۶) و ضرغامی و همکاران (۲۰۱۱) که افزایش دمایی بیش از ۲ درجه سلسیوس را در آینده برای زیرحوضه‌های واقع در حوضه دریاچه ارومیه را پیش‌بینی کردند، مطابقت دارد. روند افزایشی تبخیر در یافته‌های ما با نتایج ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر دریاچه ارومیه در مطالعه عزیزی و همکاران (۱۳۹۶)، نیز سازگار بود.

سناریوهای عملکرد محصول

طبق نتایج این مطالعه، دمای بیشینه تا بیش از ۴+ درجه سلسیوس در اواخر تابستان و اوایل پاییز که فصل برداشت چغندرقند است، گرم‌تر خواهد شد و بیشترین افزایش‌ها در دمای کمینه نیز در فصل‌های گرم سال که دوره رشد محصول است، رخ خواهد داد که می‌تواند از دلایل افزایش مقدار تبخیر در منطقه باشند. همه سناریوها حاکی از کاهش قابل‌ملاحظه در عملکرد چغندرقند تا سال ۲۰۵۰ بودند و از ۶۳/۲-٪ (S2, RCP 8.5) در آذربایجان شرقی تا ۲۱-٪ (S1, RCP4.5) در کردستان متفاوت است. با توجه به اینکه روند معنی‌داری در بارندگی منطقه به‌ویژه در طول دوره رشد محصول مشاهده نگردید و فرض بر این بود که تنش آبی محصول با آبیاری مداوم رفع می‌شود، این فرض تقویت می‌گردد که عملکرد چغندرقند به دما بسیار حساس است که با نتایج حجازی زاده و همکاران (۱۳۹۶) که نشان دادند مهم‌ترین پارامتر اقلیمی مؤثر بر کشت چغندرقند دما می‌باشد، مطابقت دارد. بر اساس یافته‌های فوق می‌توان این‌طور ادعا کرد که افزایش دما در طول دوره رشد محصول و در نتیجه افزایش تبخیر و تعرق محصول و کاهش رواناب تأثیر منفی بر عملکرد چغندرقند خواهند داشت. نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه برای عملکرد محصول با نتایج کارهای سایر محققان سازگار است، از جمله رضایی زمان و همکاران (۲۰۱۶) که کاهش ۴۲/۵ درصدی عملکرد چغندرقند در یکی از زیرحوضه‌های واقع در حوضه دریاچه ارومیه را پیش‌بینی کردند یا مطالعه ذهبیون و همکاران (۲۰۱۰) و همچنین سایر پیش‌بینی‌ها در مناطق دیگر جهان. از جمله، جونز[27] و همکاران (۲۰۰۳) و اوکم[28] (۲۰۱۷) که تأثیر منفی تغییر اقلیم آینده بر عملکرد چغندرقند را به ترتیب در بخش‌هایی از اروپا برای دوره مشابه این مطالعه (۲۰۵۰-۲۰۲۱) گزارش دادند (Okom et al., 2017).

[27] Jones
[28] Okom

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

نتیجه‌گیری

پیش‌ازاین مطالعات اندکی که بر بررسی تأثیر تغییر اقلیم در پتانسیل کشاورزی و به‌ویژه چغندرقند، به‌عنوان یک محصول استراتژیک از نظر اقتصادی و در ابعاد و گستره حوضه دریاچه ارومیه متمرکز باشند، صورت گرفته است که می‌تواند به‌عنوان یک نقطه قوت در ضرورت انجام این کار در نظر گرفته شود. در این حوضه آبخیز وجود نوسانات اقلیمی در ارزیابی‌های سایر پژوهشگران نیز به اثبات رسیده است و شامل رویدادهای شدید و حدی آب و هوایی، با آثار نامطلوب بر کیفیت و عملکرد محصولات کشاورزی می‌باشد. به‌طورکلی، نتایج این شبیه‌سازی که در این مطالعه ساخته شد گویای آن است که چغندرقند به‌شدت از تأثیر تغییر اقلیم رنج خواهد برد و با توجه به آن‌که متغیر بارش تغییرات چندانی نشان نداد می‌توان این‌طور عنوان کرد که این محصول به‌شدت تحت تأثیر افزایش دما و در نتیجه آن، تبخیر زیاد قرار دارد و اتخاذ هرچه سریع‌تر استراتژی‌های سازگاری برای کاشت چغندرقند در حوضه دریاچه ارومیه ضروری به نظر می‌رسد، راه‌کارهایی همچون: برنامه آبیاری، رهیافت‌های فرهنگی (به‌عنوان‌مثال، تاریخ برداشت) و احتمالاً استفاده از ارقام متفاوت محصول. قابل‌توجه است که نتایج هر ارزیابی در این زمینه به عوامل زیادی از جمله مدل هیدرولوژیکی و سناریوهای به‌کاررفته در آن بستگی دارد. در اینجا اثر تغییر اقلیم بر قابلیت دسترسی به آب موردنیاز آبیاری در نظر گرفته نشده و فرض بر این است که نیاز آبی محصول می‌تواند به‌طور کامل توسط منابع آب سطحی و زیرزمینی حوضه کاملاً برطرف گردد.

تقدیر و تشکر

این مقاله برگرفته از تز دکتری نویسنده اول است. این نویسنده مفتخر است تا از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری ایران به خاطر حمایت مالی پروژه در طول اقامت خود در ایواگ[۲۹] و همچنین اساتید گروه جغرافیای طبیعی و مسئولین دانشگاه خوارزمی تهران که کمال همکاری را با نویسنده به‌عنوان دانشجوی خود داشتند، قدردانی کند. با تشکر ویژه از گروه سیام[۳۰] در مرکز ایواگ، مهندس نصیری از شرکت آب منطقه‌ای، بهزاد حصاری از مرکز مطالعات دریاچه ارومیه، هیراد عبقری از دانشگاه ارومیه و حیدر طایفه رضایی و رضا رضایی از مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی برای داده‌های ارزشمند.

[29] Eawag (Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology; Dominant of ETH, Switzerland)

[30] SIAM Department System Analysis, Integrated Assessment and Modeling

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]

[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

منابع

احمدآبادی، علی، صدیقی‌فر، زهرا. (۱۳۹۷). **پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات هیدروژئومورفولوژی حوضه آبریز کن بر اساس مدل ریزمقیاس نمایی آماری**، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۸(۵۱): ۱۱۴-۱۰۳.

احمدآبادی، علی؛ کیانی، طیبه؛ غفورپور عنبران، پرستو. (۱۳۹۶). **تحلیل اثرات عملیات آبخیزداری بر روی خصوصیات هیدروژئومورفولوژی حوضه آبریز عنبران چای با استفاده از مدل نیمه توزیعی SWAT**، مدرس علوم انسانی (برنامه‌ریزی و آمایش فضا)، ۵۵-۳۳.

حجازی زاده، زهرا؛ فتح‌الله طالقانی، داریوش؛ علیقلی، سمیرا. (۱۳۹۶). **ارزیابی قابلیت‌های آگروکلیمایی استان‌های کرمانشاه و اصفهان از نظر استعداد کشت چغندرقند پاییزه**، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۷ (۴۶): ۱۵۹-۱۷۵.

حیدری، حسن؛ نادری، سمیه.«**کاربرد مدل ریاضی گامبل در تجزیه‌وتحلیل فراوانی بادهای حداکثر در پراکنش ریزگردهای دریاچه ارومیه مطالعه موردی: ارومیه**». ۲۰ اسفند ۱۳۹۳. دومین همایش ملی مهندسی و مدیریت کشاورزی، محیط‌زیست و منابع طبیعی پایدار.

دفتر کل برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا. (۱۳۸۹). **بهنگام سازی طرح جامع آب کشور در حوضه‌های ارس (تالش، تالاب انزلی)، سفیدرود بزرگ، بین سفیدرود و هراز (هراز – قره‌سو)، (گرگان رود – قره‌سو)، اترک، ارومیه**، گزارش تلفیق، زیر حوضه ارومیه.

دفتر کل برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا. (۱۳۸۹). **بهنگام سازی طرح جامع آب کشور در حوضه‌های ارس (تالش، تالاب انزلی)، سفیدرود بزرگ، بین سفیدرود و هراز (هراز- قره‌سو)، (گرگان رود- قره‌سو)، اترک، ارومیه**، مطالعات مصارف کشاورزی حوضه دریاچه ارومیه.

ذهبیون، باقر؛ گودرزی، محمدرضا؛ مساح بوانی، علیرضا. (۱۳۸۹). **کاربرد مدل SWAT در تخمین رواناب حوضه در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم**، پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱(۴-۳): ۶۰-۴۵

طایفه رضایی، حیدر. (۱۳۹۲). **گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی، ارائه هیدرومدول‌های واقعی اراضی آبخور رودخانه نازلوی ارومیه**، وزارت نیرو، سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی.

عزیزی، قاسم؛ نظیف، سارا؛ عباسی، فائزه. (۱۳۹۶). **ارزیابی سهم تغییر اقلیم بر کاهش تراز آب دریاچه ارومیه**، مطالعات میان‌رشته‌ای در علوم انسانی، ۲۱-۱.

فتاحی، ابراهیم؛ مقیمی، شوکت. (۱۳۹۸). **اثر تغییرات اقلیمی بر روند برف شمال غرب ایران، ۱۹(۵۴)**: ۶۳-۴۷.

کاویانی، محمدرضا؛ علیجانی، بهلول. (۱۳۹۰). **مبانی آب‌وهواشناسی**. سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها (سمت).

گودرزی، محمدرضا؛ فاتحی فر، آتیه. (۱۳۹۸). **پهنه‌بندی خطر سیلاب در اثر تغییرات اقلیمی تحت سناریو RCP8.5 با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT در محیط Gis حوضه آذرشهر چای)**، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، **۱۹(۵۳)**: ۱۱۷-۹۹.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

مساح بوانی، علیرضا؛ هراتیان عرب، احمد. (۱۳۹۰). «**بررسی روند تغییر اقلیم در دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۶۹ میلادی با استفاده از ریزگردانی آماری داده‌های مدل گردش عمومی HadCM3 در شهر همدان**». ۱۳ اردیبهشت ۱۳۹۰. چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران و دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

معصوم پورسماکوش، جعفر؛ میری، مرتضی؛ پورکمر، فاطمه. (۱۳۹۶). **ارزیابی داده‌های مدل‌های اقلیمی CMIP5 در مقابل داده‌های مشاهده‌ای ایران**، مجله ژئوفیزیک ایران، **۱۱(۴)**: ۵۳-۴۰.

موسسه تحقیقات آب‌وخاک کشور. (۱۳۹۵). **به هنگام سازی نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی کشور، مطالعه موردی استان آذربایجان غربی**، موسسه پژوهش‌های برنامه‌ریزی، اقتصاد کشاورزی و توسعه روستایی.

نادری، سمیه؛ علیجانی، بهلول؛ حجازی زاده، زهرا؛ عباسپور، کریم، حیدری، حسن. «**آنالیز الگوهای دما و بارش در آینده با استفاده از CCT (مطالعه موردی: حوضه آبخیز دریاچه ارومیه)**». ۲۱ خرداد ۱۳۹۸. اولین همایش بین‌المللی تغییر اقلیم، پیامدها، سازگاری و تعدیل، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

نادری، سمیه؛ علیجانی، بهلول؛ حجازی زاده، زهرا؛ عباسپور، کریم، حیدری، حسن. «**ارزیابی داده‌های هواشناسی ایستگاهی و بازتحلیل پایگاه‌های اقلیم جهانی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی**». ۲۵ و ۲۶ تیر ۱۳۹۸. چهاردهمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

وزارت نیرو. (۱۳۹۱). **دستورالعمل تقسیم‌بندی و کدگذاری حوضه‌های آبریز و محدوده‌های مطالعاتی در سطح کشور**، دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا، نشریه شماره ۳۱۰.

وزارت نیرو، (۱۳۸۹). **گزارش بهنگام سازی طرح جامع آب حوضه‌های مازندران و دریاچه ارومیه.**

Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., ... & Srinivasan, R. (2007). **Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT**. Journal of hydrology, 333(2-4), 413-430.

Abbaspour, K. C. (2011). **User Manual for SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs**. Eawag: Swiss Fed. Inst. of Aquat. Sci. and Technol., Duebendorf, Switzerland, 103.

Abbaspour, K. C. (2015). **SWAT-CUP4: SWAT calibration and uncertainty programs–a user manual**. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag.

Abbaspour, K., Vaghefi, S., & Srinivasan, R. (2017). **A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessmen**t: A review of papers from the 2016 International SWAT Conference.

Adams, R. M., Hurd, B. H., Lenhart, S., & Leary, N. (1998). E**ffects of global climate change on agriculture: an interpretative review**. Climate research, 11(1), 19-30.

Ahmadzadeh, H., Morid S, Delavar M, Srinivasan R. (2016). **Using the SWAT model to assess the impacts of changing irrigation from surface to pressurized systems on water productivity and water saving in the Zarrineh Rud catchment**. Agricultural water management 175: 15-28.

Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., ... & Edenhofer, O. (2014). **IPCC fifth assessment synthesis report-climate change 2014 synthesis report**. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. (2011). **Soil and Water Assessment Tool input/output file documentation: Version 2009**. Texas Water Resources Institute Technical Report, 365.

Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... & Kannan, N. (2012). **SWAT: Model use, calibration, and validation**. Transactions of the ASABE, 55(4), 1491-1508.

Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., ... & Edenhofer, O. (2014). **IPCC fifth assessment synthesis report-climate change 2014 synthesis report**. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.

Ashraf Vaghefi, S., Mousavi, S. J., Abbaspour, K. C., Srinivasan, R., & Yang, H. (2014). **Analyses of the impact of climate change on water resources components, drought and wheat yield in semiarid regions: Karkheh River Basin in Iran**. hydrological processes, 28(4), 2018-2032.

Bhatt, D., Maskey, S., Babel, M. S., Uhlenbrook, S., & Prasad, K. C. (2014). **Climate trends and impacts on crop production in the Koshi River basin of Nepal**. Regional Environmental Change, 14(4), 1291-1301.

Bocchiola, D., Nana, E., & Soncini, A. (2013). **Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy**. Agricultural Water Management, 116, 50-61.

Cabelguenne, M., Jones, C. A., Marty, J. R., Dyke, P. T., & Williams, J. R. (1990). **Calibration and validation of EPIC for crop rotations in southern France.** Agricultural Systems, 33(2), 153-171.

Change, I. C. (2014). **Impacts, Adaptation, and Vulnerability Summaries, Frequently Asked Questions, and Cross-Chapter Boxes**. A Contribution of Working Group ii to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland, 81-111.

Easterling, D. R., Meehl, G. A., Parmesan, C., Changnon, S. A., Karl, T. R., & Mearns, L. O. (2000). **Climate extremes: observations, modeling, and impacts**. science, 289(5487), 2068-2074.

Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Schulin, R., & Yang, H. (2009). **Modelling blue and green water resources availability in Iran**. Hydrological Processes: An International Journal, 23(3), 486-501.

Gordon, C., Cooper, C., Senior, C. A., Banks, H., Gregory, J. M., Johns, T. C., ... & Wood, R. A. (2000). **The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments**. Climate dynamics, 16(2-3), 147-168.

Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). **Reference crop evapotranspiration from temperature**. Applied engineering in agriculture, 1(2), 96-99.

Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J., & Piontek, F. (2013). **A trend-preserving PBIAS correction–the ISI-MIP approach, Earth Syst**. Dynam., 4, 219–236.

IPCC, (2007). **Climate Change 2007**. Cambridge University Press, New York.

Izaurralde, R. C., Williams, J. R., Mcgill, W. B., Rosenberg, N. J., & Jakas, M. Q. (2006). **Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data**. Ecological Modelling, 192(3-4), 362-384.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

Jaggard, K. W., Qi, A., & Ober, E. S. (2010). **Possible changes to arable crop yields by 2050**. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 365(1554), 2835-2851.

Jones, P. D., Lister, D. H., Jaggard, K. W., & Pidgeon, J. D. (2003). **Future climate impact on the productivity of sugar beet (Beta vulgaris L.) in Europe**. Climatic Change, 58(1-2), 93-108.

Lakshmanan, A., Geethalakshmi, V., Rajalakshmi, D., Bhuvaneswari, K., Srinivasan, R., Sridhar, G., ... & Annamalai, H. (2011). **Climate change adaptation strategies in the Bhavani basin using the SWAT model**. Applied engineering in agriculture, 27(6), 887-893.

Liu, J., Fritz, S., Van Wesenbeeck, C. F. A., Fuchs, M., You, L., Obersteiner, M., & Yang, H. (2008). **A spatially explicit assessment of current and future hotspots of hunger in Sub-Saharan Africa in the context of global change**. Global and Planetary Change, 64(3-4), 222-235.

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2011). **Drought modeling–A review**. Journal of Hydrology, 403(1-2), 157-175.

Monteith, J. L. (1977). **Climate and the efficiency of crop production in Britain**. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences, 281(980), 277-294.

Okom, Stanley, Andrew Russell, Abdul J. Chaudhary, Mark D. Scrimshaw, and Robert A. Francis. (2017). I**mpacts of projected precipitation changes on sugar beet yield in eastern England**. Meteorological Applications, 24(1), 52-61.

Palazzoli, I., Maskey, S., Uhlenbrook, S., Nana, E., & Bocchiola, D. (2015). **Impact of prospective climate change on water resources and crop yields in the Indrawati basin, Nepal**. Agricultural Systems, 133, 143-157.

Rezaee Zaman, Mostafa and Afruzi, Ali. (2015). **Evaluation of the climate change impacts on the crop yields and proposing the changing cropping pattern strategy (case study: Simineh Rood basin)**. Journal of Water and Soil Resources Conservation. Volume 4, Issue 4, Page 51-64, (In persian).

Salas, F. R., Somos-Valenzuela, M. A., Dugger, A., Maidment, D. R., Gochis, D. J., David, C. H., ... & Noman, N. (2018). **Towards Real-Time Continental Scale Streamflow Simulation in Continuous and Discrete Space**. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 54(1), 7-27.

Shadkam, S., Ludwig F, van Oel P, Kirmit Ç, Kabat P. (2016). I**mpacts of climate change and water resources development on the declining inflow into Iran's Urmia Lake**. Journal of Great Lakes Research 42(5): 942-952.

Shakya, M. K. (2011). **Assessing water resources availability in Indrawati river basin in Nepal: application of SWAT model for hydrologic simulation,** Doctoral dissertation, Unesco-IHE.

Stockle, C. O., Paul T. Dyke, Jimmy R. Williams, C. Allan Jones, and Norman J. Rosenberg. (1992). **A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops: Part II—Sensitivity analysis at three sites in the Midwestern USA**. Agricultural Systems, 38(KlC3B8ve et al.), 239-256.

Stockle, C. O., & Nelson, R. (2003). **Cropping systems simulation model user's manual**. Washing State University, Pullman, Washington, USA, 235.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]

Sun, Ge, Guoyi Zhou, Zhiqiang Zhang, Xiaohua Wei, Steven G. McNulty, and James M. Vose. (2006). **Potential water yield reduction due to forestation across China**. Journal of Hydrology, 328(3-4), 548-558.

Tao, F., Zhang, Z., Liu, J., & Yokozawa, M. (2009). **Modelling the impacts of weather and climate variability on crop productivity over a large area: A new super-ensemble-based probabilistic projection**. Agricultural and Forest Meteorology, 149(8), 1266-1278.

Vaghefi, S. A., Abbaspour, N., Kamali, B., & Abbaspour, K. C. (2017). **A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions–Case study: California-Baja California Peninsula**. Environmental modelling & software, 96, 181-198.

Verbeeten, E., & Barendregt, A. (2007). **Assessing the impact of climate change on the water balance in semi-arid West Africa: a SWAT application**. GI-Days, 309-312.

Wang, B., Zheng, L., Liu, D. L., Ji, F., Clark, A., & Yu, Q. (2018). **Using multi-model ensembles of CMIP5 global climate models to reproduce observed monthly rainfall and temperature with machine learning methods in Australia**. International Journal of Climatology, 38(13), 4891-4902.

Wilby, R. L., & Harris, I. (2006). **A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK**. Water resources research, 42(2).

Willmott, Cort J. (1981). **On the validation of models**. Physical geography, 2(2), 184-194.

White, K. L., & Chaubey, I. (2005). **Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model**. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 41(5), 1077-1089.

Zaman, M. R., Morid, S., & Delavar, M. (2016). **Evaluating climate adaptation strategies on agricultural production in the Siminehrud catchment and inflow into Lake Urmia, Iran using SWAT within an OECD framework**. Agricultural Systems, 147, 98-110.

Zarghami, M., Abdi, A., Babaeian, I., Hassanzadeh, Y., & Kanani, R. (2011). **Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran**. Global and Planetary Change, 78(3-4), 137-146.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1300.0.0.78.1]
[DOI: 10.61186/jgs.24.73.1]