



Predicting the Effects of Climate Change and Land Use on the Spatial and Temporal Changes of Groundwater Rescharge Using the WetSpass-M distribution Model (Case Study of Hashtgerd Plain, Iran)

Abolfazl Hanifehlou¹ | Seyed Abbas Hosseini² | Saman Javadi³ | Ahmad Sharafati⁴

1. Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: a.hanifeloo@abfa-alborz.ir
2. Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir
3. Corresponding Author, Department of Water Engineering, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: javadis@ut.ac.ir
4. Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: asharafati@srbiau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: October 26, 2022
Received in revised form:
December 1, 2022
Accepted: January 18, 2023
Published online: April 14, 2023

Keywords:

Climate change,
ENVI,
Land use change,
Markov chain,
TerrSet,
water balance.

ABSTRACT

This study aimed to estimate groundwater recharge along with other balance components (runoff, evapotranspiration, and transpiration) in Hashtgerd plain, using the WetSpass-M distribution model in the conditions of climate change and land use in the next 30 years. To study the effects of climate change, the output of five models under four emission scenarios, i.e., RCP2.6, RCP4.5, RCP6, and RCP8.5 of the Fifth Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) was utilized. The LARS-WG model was also used for the downscaling of the climatic data. Land-use mapping was performed using Landsat images in 1990, 2005, and 2020 processed in ENVI 5.3. The Markov chain method in TerrSet software was used to predict land-use changes for 2050. In the end, the effect of climate change and land use on underground water supply and other water balance components was simulated using the WetSpass-M distribution model for the period 2050-2020 and the effect of climate and land use scenarios was applied on it. The climate change results showed that the annual temperature will increase by 1.2 and 3.2 degrees Celsius until 2050 for the RCP2.6 and RCP8.5 scenarios, respectively, and the annual precipitation will decrease by 1.95 and 4.47 Percent for both scenarios. The results of land use change show an increase of 105, 41, and 8 percent for residential, barren, and agricultural land, respectively, and a 94 percent decrease in pastures. With the increase of residential and barren uses and the decrease of pastureland, the permeability of the land will decrease, and as a result, the amount of surface discharge of the aquifer will decrease. Estimates, in general, showed that climate change has caused a decrease, land use change has increased the feeding of the aquifer in such a way that in the most critical scenario the amount of feeding will reach 220.6, and the balance of the aquifer will reach 115.9 million cubic meters per year. Because of climate and land use changes, the share of evaporation and transpiration has increased and the share of recharge and runoff from precipitation has decreased. In general, in the highlands due to more rainfall and in agricultural areas due to irrigation return water, the contribution of underground water supply has increased.

Cite this article: Hanifehlou, A., Hosseini, S. A., Javadi, S., & Sharafati, A. (2023). Predicting the Effects of Climate Change and Land Use on the Spatial and Temporal Changes of Groundwater Rescharge Using the WetSpass-M distribution Model (Case Study of Hashtgerd Plain, Iran). *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (1), 43-62. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.350426.1026>





پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم و کاربری زمین بر تغییرات مکانی و زمانی تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از مدل توزیعی WetSpa-M (مطالعه موردی: دشت هشتگرد، ایران)

ابوالفضل حنیفه لو^۱ | سیدعباس حسینی^۲ | سامان جوادی^۳ | احمد شرافتی^۴

۱. گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: a.hanifeloo@abfa-alborz.ir

۲. گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران. رایانامه: javadis@ut.ac.ir

۴. گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: asharafati@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵

چکیده

هدف اصلی این پژوهش، برآورد تغذیه آب زیرزمینی در کنار دیگر مؤلفه‌های بیلان (رواناب، تبخیر و تعرق و برگاب) در دشت هشتگرد، با استفاده از مدل توزیعی WetSpa-M در شرایط تغییرات اقلیم و کاربری زمین در دوره ۳۰ سال آتی است. نقشه کاربری زمین با استفاده از تصاویر ماهواره لندست سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ در نرم‌افزار ENVI (نسخه ۵.۳) تهیه و برای مدل‌سازی تغییرات کاربری زمین در سال ۲۰۵۰، از روش زنجیره‌مارکف پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار TerrSet استفاده شد. در پایان، تأثیر تغییر اقلیم و کاربری زمین بر تغذیه آب زیرزمینی و دیگر مؤلفه‌های بیلان آبی با استفاده از مدل توزیعی WetSpa-M برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ شبیه‌سازی شده و اثر سناریوهای اقلیمی و کاربری زمین بر روی آن اعمال شد. نتایج تغییرات اقلیمی نشان داد دمای سالانه تا سال ۲۰۵۰ برای سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۱/۲ و ۳/۲ درجه سانتی‌گراد افزایش و بارش سالانه برای هر دو سناریو ۱/۹۵ درصد و ۴/۴۷ درصد کاهش خواهد یافت. نتایج تغییر کاربری، نشان‌دهنده افزایش ۱۰۵، ۴۱ و ۸۱ درصدی به ترتیب برای زمین مسکونی، بایر و کشاورزی و کاهش ۹۴ درصدی در مراتع است. با افزایش کاربری‌های مسکونی و بایر و کاهش مرتع میزان تغذیه به ۲۲۰/۶ و بیلان آبخوان به ۱۱۵/۹- میلیون مترمکعب در سال خواهد رسید. در اثر تغییرات اقلیم و کاربری زمین سهم تبخیر و تعرق افزایش و سهم تغذیه و برگاب از بارش کاهش یافته است. به‌طور کلی، در ارتفاعات به دلیل بارش بیش‌تر و در مناطق کشاورزی به دلیل آب برگشتی آبیاری، سهم تغذیه آب زیرزمینی افزایش یافته است.

کلیدواژه‌ها:

بیلان آب،
تغییر اقلیم،
تغییر کاربری زمین،
زنجیره مارکف،
ENVI،
TerrSet

استناد: حنیفه لو، ا.، حسینی، س. ع.، جوادی، س. و شرافتی، ا. (۱۴۰۲). پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم و کاربری زمین بر تغییرات مکانی و زمانی تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از مدل توزیعی WetSpa-M (مطالعه موردی: دشت هشتگرد، ایران). *تشریح مدیریت آب و آبیاری*، ۱۳ (۱)، ۴۳-۶۲.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.350426.1026>



۱. مقدمه

امروزه، با نگرش به بحران جهانی آب، توجه به مدیریت پایدار منابع آب امری بایسته است. در این میان، نقش آب‌های زیرزمینی، برای برآورد نیازهای آبی پهنه‌های نیمه‌خشک بر کسی پوشیده نیست. در مناطق نیمه‌خشک، ارزیابی آسیب‌پذیری منابع از اهمیت بالایی برخوردار است. تغییرات احتمالی که یک سامانه آبی در آینده با آن‌ها روبه‌رو خواهد شد، تغییرات آب‌وهوایی و کاربری زمین است (Orozco *et al.*, 2020). روی‌هم‌رفته، سه ویژگی اولیه حوزه آبخیز شامل خاک، کاربری زمین، توپوگرافی به‌همراه ویژگی‌های اقلیمی (بارندگی و دما)، تغییرات هیدرولوژیک حوزه‌های آبخیز را تحت تأثیر قرار می‌دهند. دو ویژگی خاک و توپوگرافی تغییرات کوتاه‌مدت نداشته و می‌توان آن‌ها را بخشی از عوامل ایستا محسوب کرد. به هر حال، تغییر در واکنش هیدرولوژیک یک حوضه در مقیاس زمانی میان‌مدت به تغییر نوع کاربری و تغییرات اقلیمی بستگی دارد (Bahri *et al.*, 2013). بسیاری از پژوهش‌گران بیان داشته‌اند تغییر کاربری زمین در کنار تغییر اقلیم، تأثیر به‌سزایی در تشدید سیلاب و کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی دارد (Mango *et al.*, 2011; Liaquat *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2019). برخی، حتی اعتقاد به تأثیر بیش‌تر تغییر کاربری زمین نسبت به تغییر اقلیم، بر شدت سیلاب و کاهش تغذیه آبخوان دارند (Aggarwal *et al.*, 2012). تأثیرات تغییر اقلیم به‌عنوان مسائل چالش برانگیز برای نسل کنونی افزایش یافته است، که گمان می‌رود در آینده، به‌دلیل مداخلات انسانی با طبیعت بدتر شود (Guptha *et al.*, 2021, 2022; Purandara *et al.*, 2018; Swain *et al.*, 2020a, b). مطالعات متعددی در مورد تأثیر تغییر اقلیم و کاربری زمین بر منابع آب انجام شده که در زیر به‌طور خلاصه بیان می‌شود.

Dau *et al.* (2021) انطباق سیستم منابع آب هیمالیا هند را برای بهره‌برداری پایدار تحت تغییرات اقلیم و کاربری زمین موردبررسی قرار دادند. Tsarouchi and Buytaert (2018) تأثیر تغییر کاربری زمین و تغییرات اقلیم را بر منابع آب در حوضه گنگ بالا در شمال هند در آینده شبیه‌سازی کردند. مطالعات نشان داد که تأثیر هم‌زمان تغییر اقلیم و کاربری زمین بیش‌ترین تأثیر را بر منابع آب داشته و جریان سیل را تا ۶۳ درصد افزایش داده است. اثرات تغییر کاربری زمین و تغییر اقلیم بر منابع آب در منطقه دریای بالتیک شرقی، توسط Tomm *et al.* (2018) و بر سرشاخه‌های رودخانه دیدسا در جنوب‌غربی آبی نیل در اتیوپی، توسط Chimdessa *et al.* (2018) بررسی شد. در سال ۱۳۹۷، اثرات تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی، در دشت هشتگرد، به‌وسیله Mehrazar *et al.* (2018) مورد کاوش قرار گرفت. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب دشت هشتگرد توسط Mortazavizadeh and Godarzi (2018)، تحلیل عدم قطعیت تراز آب زیرزمینی دشت هشتگرد در شرایط تغییر اقلیم توسط Rasaei *et al.* (2020) از دیگر پژوهش‌ها در این زمینه است. در این مطالعات، اثرات ترکیبی و مجزای کاربری زمین و تغییرات اقلیمی بر منابع آب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی موردارزیابی قرار گرفته است. Lamichhane and Shakya (2020) تأثیر تغییر کاربری زمین را بر تغذیه آب زیرزمینی در دشت‌های کاتماندو در نپال مطالعه کردند و اثرات آن را برای سال ۲۰۵۰ پیش‌بینی کردند. Dubois *et al.* (2021) اثرات تغییر اقلیم بر تغذیه آب زیرزمینی در اقلیم‌های سرد و مرطوب را برای استان جنوبی کبک (کانادا) با استفاده از مدل بودجه آب شبیه‌سازی کرد. Yifru *et al.* (2021) تأثیر تغییرات اقلیم و کاربری زمین را بر بیلان آب و تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از مدل جفت شده SWAT-MODFLOW موردبررسی قرار داد. Nair *et al.* (2021) تخریب پوشش زمین در ۳۰ سال گذشته از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵ و تأثیر آن بر رژیم آب‌های زیرزمینی برای منطقه غربی ویداربا در مرکز هند را بررسی کردند. Adhikari *et al.* (2020) اثرات تغییر کاربری زمین را بر تغذیه آب زیرزمینی در شهر هوشی‌مین، ویتنام بررسی کرد. آن‌ها از سه سناریوی افزایش کم، متوسط و زیاد در مناطق شهری برای پیش‌بینی تغییر کاربری زمین در سال ۲۱۰۰ استفاده کردند. Andriani *et al.* (2022) توزیع مکانی-زمانی تغذیه بالقوه آب زیرزمینی در

آبخوان آب تسوج در شمال غرب ایران را تحت سناریوهای تغییر اقلیم ارزیابی کردند. Boumaiza *et al.* (2022) نیز ارزیابی فضایی و زمانی منطقه‌ای و تأثیر تغییرات اقلیم بر تغذیه آب‌های زیرزمینی در ۱۰۰ سال گذشته در یکی از مناطق کانادا مورد پژوهش قرار دادند.

در کنار پیش‌بینی تغییرات اقلیم و کاربری زمین، ارزیابی توزیع زمانی و مکانی تغذیه آب زیرزمینی، یک عامل کلیدی برای برنامه‌ریزی بلندمدت منابع آب زیرزمینی است. البته، با نگرش به ارتباط مؤلفه‌های بیلان آب با یکدیگر، بررسی تغذیه، نیازمند در نظر گرفتن دیگر عوامل هیدرولوژیکی است. برآورد نرخ تغذیه یک فرایند پیچیده و چالش برانگیز است، از همین‌رو، برآورد درست این میزان می‌تواند نقش مهمی در مدیریت و توسعه پایدار منابع آب سطحی و زیرزمینی داشته باشد (Mahmudi *et al.*, 2019).

برای برآورد تغذیه روش‌ها و مدل‌های گوناگونی وجود دارد. یکی از مدل‌های توزیعی بیلان آب و خاک، مدل WetSpas-M با قابلیت استفاده در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که توانایی شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب در مقیاس زمانی ماهانه را دارد (Abdollahi *et al.*, 2017). در این زمینه، مطالعات زیادی با استفاده از مدل WetSpas در نقاط مختلف جهان انجام شده که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود (جدول ۱).

Table 1. Summary of research studies conducted using the WetSpas model

Research topic	Year	Researcher's name
Investigating the water balance of Vanak watershed	2018	Bayati <i>et al.</i>
Investigating the spatial distribution of runoff and groundwater recharge in land use classes and the slope of Vanak watershed	2019	Abdulahi <i>et al.</i>
Simulation of runoff, evaporation, reabsorption and underground water feeding of Lake Urmia	2020	Bashirian <i>et al.</i>
Evaluation of spatial and temporal changes of water balance in Bilate basin located in Ethiopia	2021	Nannawo <i>et al.</i>
Determining the components of groundwater balance for a period of 20 years in Pakistan	2021	Aslam <i>et al.</i>
Investigating the effect of climate change and land use on underground water supply	2021	Ghimire <i>et al.</i>
Spatial and temporal simulation of groundwater recharge for volcanic aquifers of Lake Tana basin in northwestern Ethiopia.	2021	Yenehu <i>et al.</i>

بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که در بیش‌تر مطالعات تنها به تأثیرات تغییر کاربری زمین در گذشته توجه شده و مطالعات کم‌تری برای پیش‌بینی آینده آن انجام شده است. در برآورد تغذیه آب زیرزمینی نیز کم‌تر به تأثیر هم‌زمان تغییر اقلیم و کاربری زمین پرداخته شده است. با توجه به کاستی‌های موجود در پژوهش‌های مرتبط، هدف از این پژوهش بررسی اثرات ترکیبی تغییر اقلیم و کاربری زمین به صورت مستقل و تلفیقی بر تغییرات تغذیه آبخوان دشت هشتگرد در ۳۰ سال آتی با استفاده از مدل WetSpas-M می‌باشد. این پژوهش از نظر روش‌ها و رویکردها دارای نوآوری‌های زیر است: ۱- اولین پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی دشت هشتگرد در آینده، ۲- اولین اثر هم‌زمان تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر آب‌های زیرزمینی دشت هشتگرد.

۲. مواد و روش‌ها

مراحل انجام کار در شکل (۱) نشان داده شده است. در روش پژوهش به‌طور خلاصه، نخست نقشه کاربری زمین سه‌ساله ۱۹۹۰، ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ از روی تصاویر ماهواره‌ای رده‌بندی شده است. سپس با کمک آن‌ها نقشه کاربری زمین سال ۲۰۵۰ پیش‌بینی می‌شود. هم‌زمان، تغییرات اقلیمی برای سال ۲۰۵۰ پیش‌بینی شده و مقادیر بارندگی و دما استخراج می‌شود. در ادامه از نتایج کاربری زمین و تغییر اقلیم برای پیش‌بینی میزان تغذیه آب زیرزمینی توسط مدل WetSpas-M استفاده شده است.

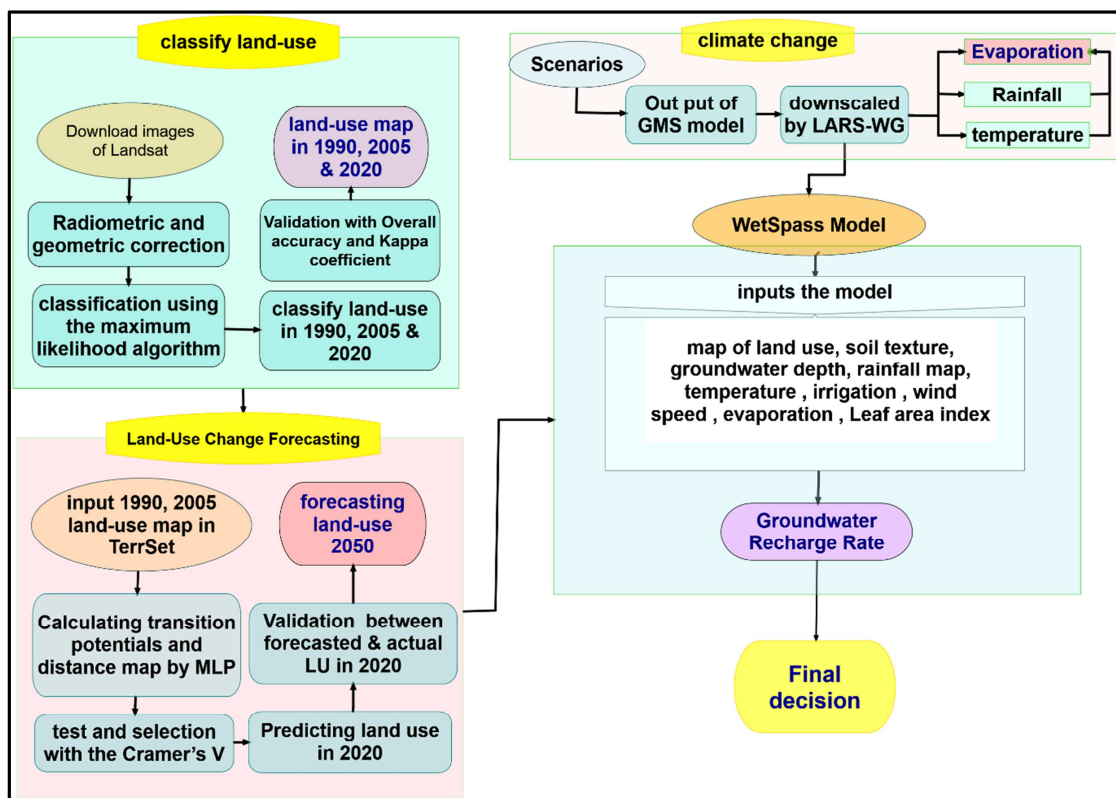


Figure 1. Steps of conducting the research method

۱.۲. منطقه مطالعه شده

دشت هشتگرد در استان البرز، با وسعت ۱۲۷۱ کیلومترمربع، یکی از زیرحوضه های اصلی حوضه آبریز دریاچه نمک کشور ایران است و در شمال آن قرار دارد (شکل ۲). حوضه هشتگرد از شمال به حوضه آبریز درجه دو سفیدرود بزرگ، از جنوب به محدوده اشتهارد، از غرب به محدوده قزوین و از شرق به محدوده تهران - کرج، محدود شده است. این حوضه بین طول‌های جغرافیایی ۵۰/۳ تا ۵۰/۰ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۵/۷ تا ۳۶/۱ درجه شمالی گسترده شده است. ضریب ذخیره آبخوان هشتگرد شش درصد بوده و متوسط بارندگی سالیانه در یک دوره ۳۰ ساله در این منطقه ۳۴۱ میلی‌متر و متوسط دمای سالیانه آن ۱۳ درجه سانتی‌گراد است. اطلاعات بیان هیدروکلیماتولوژی دشت هشتگرد نیز در جدول (۲) نشان داده شده است (Regional Water Company of Tehran, 2013).

Table 2. Hydroclimatology and water balance of plains and mountains for Hashtgerd study area

Range	Area (km ²)	Rainfall volume (MCM)	Evapotranspiration (from rainfall) (MCM)	Effective rainfall (MCM)	
				Recharghe	Runoff
Plain	579	255.8	115.0	39.4	13.2
Mountains	591.6	167.5	123.7	33.0	99.0

در سال آبی ۱۳۹۶-۹۷ تخلیه سالانه آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی هشتگرد به حدود ۳۲۸/۴ میلیون مترمکعب رسیده که چاه‌های بهره‌برداری با اختصاص ۹۷ درصد تخلیه سالانه (۳۱۸ میلیون مترمکعب)، اصلی‌ترین منبع زیرزمینی در این محدوده محسوب می‌شوند. قنات و چشمه‌های موجود در این محدوده به ترتیب ۳/۴ و شش میلیون مترمکعب از

تخلیه سالانه آب زیرزمینی را به خود اختصاص می‌دهند. مهم‌ترین رودخانه موجود در این محدوده، رودخانه کردان می‌باشد که آبدهی سالانه حدود ۹۱ میلیون مترمکعب را دارا می‌باشد (RIWEM, 2021). حجم آب مصرفی در این محدوده مطالعاتی برابر با ۳۶۳/۱ میلیون مترمکعب در سال است که ۳۲۰/۳ میلیون مترمکعب از آب‌های زیرزمینی (چاه و قنات) و ۴۲/۷ میلیون مترمکعب در سال از جریان‌های سطحی و چشمه است که به ترتیب ۳۳۰/۸ میلیون مترمکعب به مصرف کشاورزی ۲۴/۳ میلیون مترمکعب مصرف شرب و ۷/۹ میلیون مترمکعب به مصرف صنعت می‌رسد (RIWEM, 2021). در شکل (۲) موقعیت محدوده مطالعاتی هشتگرد مشاهده می‌شود.

۲.۲. شبیه‌سازی تغییر اقلیم

برای تولید داده‌های هواشناسی سال‌های آینده، از خروجی پنج مدل عمومی جوی- اقیانوسی مطابق جدول (۳) تحت دو سناریوی انتشار RCP2.6 و RCP8.5 مربوط به پنجمین گزارش ارزیابی هیئت جهانی تغییر اقلیم، استفاده شد. جهت ریزمقیاس نمایی خروجی این سناریوها به مقیاس محلی، از مدل LARS-WG استفاده شد. نخست تغییر اقلیم با استفاده از داده‌های مرجع (۲۰۰۵-۱۹۸۶) ایستگاه سینوپتیک قزوین شبیه‌سازی شد. سپس نتایج مدل با داده‌های مشاهده‌ای سال‌های ۲۰۰۶-۲۰۲۰ اعتبارسنجی شد. پس از اعتبارسنجی، داده‌های سری زمانی دما و بارندگی روزانه در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۰ تحت دو سناریوی انتشار مطابق جدول (۴) تولید شد. نتایج نشان‌دهنده کاهش در میانگین بارندگی سالانه و افزایش میانگین دمای سالانه است.

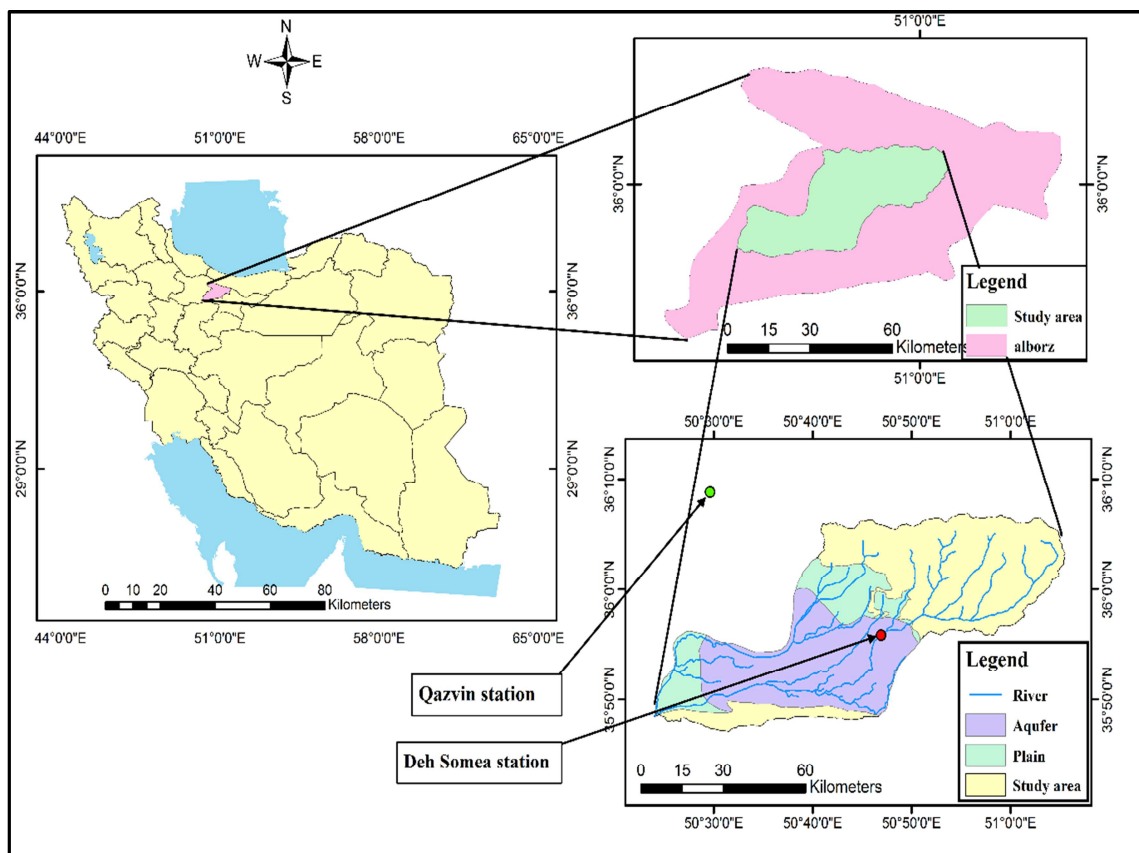


Figure 2. Location of Hashtgerd study area

Table 3. Characteristics of General Circulation Models

Model	Founding group	Resolution	Reference	Scenarios	Reference
MIROC-ESM	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo)	2.8° * 2.8°	Watanabe <i>et al</i> , 2010	RCP2.6 - RCP4.5 - RCP6 - RCP8.5	Watanabe <i>et al</i> , 2010
MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology Germany	1.9° * 1.9°	Giorgetta <i>et al</i> , 2013	RCP2.6 - RCP4.5 - RCP8.5	Giorgetta <i>et al</i> , 2013
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre, UK	2° * 2.5°	Martin <i>et al</i> . 2011	RCP2.6 - RCP4.5 - RCP6 - RCP8.5	Martin <i>et al</i> . 2011
EC-EARTH	EC-EARTH consortium published at Irish Centre for High-End Computing Netherlands/Ireland	1.1° * 1.1°	Hazeleger <i>et al</i> , 2010	RCP2.6 - RCP4.5 - RCP8.5	Hazeleger <i>et al</i> , 2010
GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	1.9° * 1.9°	http://www.gfdl.noaa.gov/	RCP2.6 - RCP4.5 - RCP6 - RCP8.5	http://www.gfdl.noaa.gov/

نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل LARS-WG با به‌کارگیری دو شاخص ضریب تبیین (R^2) و ضریب کارایی نش - ساتکیف (NS) مطابق روابط زیر ارزیابی شد (Purandara *et al.*, 2018)، که نتایج R^2 و NS به ترتیب برای دما ۰/۸۶ و ۰/۹۳ و برای بارش ۰/۸۳ و ۰/۹۳ محاسبه شد که نشان‌دهنده درجه اعتبار بالا می‌باشد.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_1^N (O_i - O_{avg})(M_i - M_{avg})}{\sqrt{\sum_1^N (O_i - O_{avg})^2} \sqrt{\sum_1^N (M_i - M_{avg})^2}} \right]^2 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$NS = 1 - \left[\frac{\sum_1^N (O_i - M_i)^2}{\sum_1^N (O_i - O_{avg})^2} \right] \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن‌ها، N تعداد داده‌ها، O_i داده‌های مشاهده‌ای، M_i داده‌های شبیه‌سازی‌شده، O_{avg} میانگین داده‌های مشاهده‌ای و M_{avg} میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده است.

Table 4. The results of climate change in the period of 2020-2050

Season	Temperature increase (C)		Rainfall change (%)	
	2.6 RCP	8.5 RCP	2.6 RCP	8.5 RCP
Winter	1.2	3.0	-0.4	-1.3
Spring	1.1	3.1	2.8	-8.6
Summer	1.6	3.5	-3.2	-9.4
Autumn	1.5	3.3	-2.1	-3.6
Annual	1.4	3.2	-0.7	-5.7

۳.۲. پیش‌بینی کاربری زمین

۱.۳.۲. استخراج نقشه‌های کاربری زمین

برای پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین آتی، بررسی روند تغییرات کاربری زمین در گذشته ضروری است. تجزیه و تحلیل کاربری زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌های TM Landsat-5 برای سال ۱۹۹۰، ETM+Landsat-7 برای سال

۲۰۰۵ و OLI_TIRS Landsat-8 برای سال ۲۰۲۰ انجام شد. پردازش رده‌بندی کاربری زمین با استفاده از نرم‌افزار ENVI 5.3 انجام شد. تصحیحات هندسی و رادیومتری روی تصاویر انجام شد تا اطمینان حاصل شود که داده‌ها عاری از هرگونه خطای رادیومتری، نوارشدگی یا هندسی باشند (Birhanu *et al.*, 2019). یکی از نکات کلیدی در تهیه نقشه‌های کاربری زمین از روی تصاویر ماهواره‌ای، دستیابی به تعریف روشنی از طبقات کاربری‌ها در منطقه است (Marhaento *et al.*, 2018). پس از بررسی وضعیت کاربری‌های موجود در منطقه و کسب نظر کارشناسان، کاربری‌ها به چهار رده مسکونی، کشاورزی، مرتع و بایر تقسیم شدند.

سپس از تصاویر ماهواره‌ای برای هر یک از طبقات تعریف‌شده نمونه‌برداری شد. ۷۰ درصد نمونه‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شدند و در نهایت نقشه‌های کاربری زمین در سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ با استفاده از الگوریتم برآورد حداکثر احتمال به‌عنوان یک روش رده‌بندی نظارت‌شده قوی در نرم‌افزار ENVI تهیه شد. این الگوریتم واریانس و کوواریانس طبقات را ارزیابی می‌کند (Islam *et al.*, 2018).

پس از تهیه نقشه‌های کاربری، نتایج با استفاده از ۳۰ درصد نمونه‌ها اعتبارسنجی شد. برای ارزیابی نقشه‌های تولیدشده و عملکرد رده‌بندی از دقت کلی و ضریب کاپا استفاده شد. دقت کلی و ضریب کاپا تصاویر رده‌بندی‌شده به ترتیب ۸۹/۶ درصد، ۹۲/۱ درصد، ۹۴/۳ درصد و ۰/۸۷، ۰/۸۹، و ۱/۹۲ برای سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰ است. بیش‌ترین دقت مربوط به سال ۲۰۲۰ به دلیل وضوح رادیومتری بالاتر تصاویر است.

۲.۳.۲. پیش‌بینی تغییرات کاربری‌های زمین آینده

برای پیش‌بینی تغییرات کاربری زمین در آینده، از برنامه مدل‌سازی تغییر زمین (LCM) در نرم‌افزار TerrSet استفاده شد. نخست نقشه‌های کاربری زمین سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۰۵ به همراه نقشه‌های DEM و شیب منطقه به‌عنوان ورودی وارد نرم‌افزار شد و نقشه کاربری ۲۰۲۰ پیش‌بینی شد. سپس از نقشه موجود کاربری زمین سال ۲۰۲۰ برای اعتبارسنجی نقشه کاربری تولیدشده مدل استفاده شد. زنجیره مارکوف دنباله‌ای از فرایندهای تصادفی است که در آن نتیجه هر فرایند به نتیجه فرایند در زمان مجاور بستگی دارد (Noszczky, 2019). این مدل یک ابزار توصیفی کلیدی دارد و آن ماتریس انتقالات است (Arsanjani *et al.*, 2013). نقشه‌های تبدیلات پتانسیل با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی، از نقشه‌های توپوگرافی، جهت، شیب، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه اصلی و فاصله از زمین مسکونی تعیین می‌شود. سپس هر یک از نقشه‌های تبدیلات پتانسیل به وسیله ضریب کرامر ارزیابی شده و فقط متغیرهای با ضریب بالاتر از ۰/۱۵ برای مدل‌سازی پیش‌بینی تغییرات در نظر گرفته می‌شوند (Sundara Kumar *et al.*, 2016). در نهایت، پس از تعدیل مدل‌های فرعی، نقشه کاربری زمین سال‌های آتی پیش‌بینی می‌شود.

شاخص‌های مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد مدل، دقت کلی پیش‌بینی و ضریب کاپا بود. دقت کلی ۸۶/۳۴ و ضریب کاپا ۰/۸۲ در مرحله اعتبارسنجی نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل است. پس از اعتبارسنجی مدل، نقشه کاربری زمین برای سال ۲۰۵۰ پیش‌بینی شد. شکل (۳) نقشه کاربری‌های زمین سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۵، ۲۰۲۰ و ۲۰۵۰ را نشان می‌دهد. مطابق نتایج در سال ۲۰۵۰ نسبت به سال ۲۰۲۰، مساحت مرتع ۹۴ درصد کاهش داشته، در حالی که زمین کشاورزی، مسکونی و بایر به ترتیب هشت، ۱۰۵ و ۴۱ درصد افزایش یافته است.

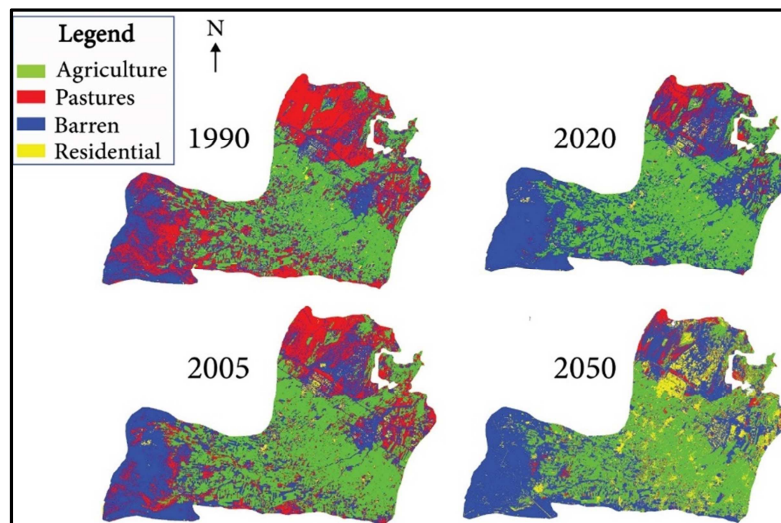


Figure 3. Land use changes during 1990-2050

۳.۳.۲. برآورد مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی

به منظور برآورد مؤلفه بیلان آب زیرزمینی از مدل استفاده شد. به منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل از داده‌های دبی ماهانه ایستگاه هیدرومتری ده صومعه به عنوان داده‌های مشاهداتی استفاده شد. با توجه به مقادیر ناچیز جریان سطحی در محدوده مورد مطالعه به منظور بررسی اطمینان بیشتر نتایج مدل، از داده‌های تبخیر و تعرق واقعی برآورد شده توسط الگوریتم SEBAL نیز جهت اعتبارسنجی مدل استفاده شد. الگوریتم SEBAL ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای را به همراه اطلاعات و برداشت‌های زمینی معمول هواشناسی به طور مستقیم و غیرمستقیم مورد استفاده قرار می‌دهد. داده‌های مورد نیاز این الگوریتم شامل باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و حرارتی یک تصویر ماهواره‌ای به همراه نقشه DEM و داده‌های ثانویه هواشناسی مثل دما، رطوبت، فشار و سرعت باد می‌باشد. در این پژوهش از تصاویر ماهواره لندست هشت استفاده شد.

مدل WetSpas-M یک مدل توزیعی بیلان آب برای شبیه‌سازی میانگین سالانه یا فصلی تغذیه آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق، رواناب و برگاب با استفاده از روابط فیزیکی و تجربی است. این مدل، بیلان آب را در یک محیط اطلاعات جغرافیایی GIS ادغام می‌کند و به برآورد توزیع زمانی و مکانی تغذیه در بلندمدت می‌پردازد. بررسی توزیع مکان یکی از مهم‌ترین مزایای این مدل است (Batelaan and Smedt, 2001).

به این ترتیب در هر سلول، محاسبه تبخیر و تعرق، رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی صورت گرفته و برای کل محدوده با هم جمع می‌شوند که در روابط زیر نشان داده شده است. ET_{raster} ، S_{raster} و R_{raster} به ترتیب معادل تبخیر و تعرق، رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی برای یک شبکه سلولی می‌باشد که هر کدام دارای قسمت‌های گیاهی، سطح خاک، سطح آب و سطح نفوذناپذیر (به ترتیب av ، as ، ao و ai) می‌باشد.

$$ET_{raster} = avET_v + asE_s + aoE_o + aiE_i \quad \text{رابطه ۳}$$

$$S_{raster} = avS_v + asS_s + aoS_o + aiS_i \quad \text{رابطه ۴}$$

$$R_{raster} = avR_v + asR_s + aoR_o + aiR_i \quad \text{رابطه ۵}$$

فرمول محاسبه مقدار رواناب سطحی در مدل WetSpas-M به صورت زیر است (Abdollahi et al., 2017):

$$SR_m = C_{sr} C_h (P_m - I_m) \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن، SR_m مقدار رواناب سطحی (میلی‌متر)، C_h ضریب رطوبت خاک (بی‌بعد) و C_{sr} ضریب رواناب واقعی (بی‌بعد) هستند.

در مدل WetSpas-M، برآورد تبخیر و تعرق واقعی همانند دیگر مؤلفه‌ها در هر سلول صورت می‌پذیرد. برای محاسبه تعرق گیاه مرجع از تبخیر و تعرق پتانسیل (ET_p)، نیاز به ضریب پوشش گیاهی دارد که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C = \frac{1 + \frac{\gamma}{\Delta}}{1 + \frac{\gamma}{\Delta} (1 + \frac{r_a}{r_c})} \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در این رابطه، γ ثابت سایکرومتری برحسب کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد، Δ گرادیان مشتق اول از منحنی فشار بخار اشباع (شیب فشار بخار اشباع در دمای جو) برحسب کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد، r_c مقاومت سطحی توده‌ای برحسب ثانیه بر متر و r_a مقاومت آیرودینامیکی است (Abdollahi et al., 2017).

مدل WetSpas-M نقشه‌های توزیع مکانی تغذیه را به عنوان خروجی ارائه می‌دهد. P_m معادل آب‌های ورودی از جمله بارش، آب انتقالی، برگشتی آبیاری، شرب، صنعت و فضای سبز می‌باشد و تغذیه ماهانه R_m برحسب میلی‌متر در ماه به عنوان باقیمانده بیلان آب به صورت زیر محاسبه می‌شود (Abdollahi et al., 2017).

$$R_m = P_m - SR_m - ET_m \quad (\text{رابطه ۸})$$

۲.۳.۴. داده‌های ورودی مدل

تمام ورودی‌های مدل به جز تعداد روزهای بارانی که متوسط‌گیری مکانی می‌شود، به صورت نقشه‌های رستری بوده که در محیط ArcGIS تهیه می‌شوند. خروجی‌های مدل نیز به صورت نقشه و شامل یک فایل خلاصه از متوسط‌گیری حوضه‌ای است.

در این مطالعه همه نقشه‌های رستری ورودی به مدل با ابعاد سلول 90×90 متر و تعداد ستون ۱۲۹۱ و تعداد سطر ۱۰۸۶ در محیط نرم‌افزار ArcGIS مطابق جدول (۵) تهیه شدند. با توجه به دوره آماری هشت ساله برای هر پارامتر تعداد ۹۶ نقشه به صورت رستری برای هر پارامتر در هر ماه ساخته شد.

Table 5. Input parameters of WetSpas-M model

Input parameter	Processing tool/method	Number	Resolution
Land-use map	Lookup according to WetSpas-M model	1	100×100
Soil texture map	Lookup according to WetSpas-M model	1	100×100
Rain maps	Interpolation using Kriging	96	100×100
Irrigation maps	According to the pumping from wells	96	100×100
Groundwater depth maps	Interpolation using Kriging	96	100×100
Temperature maps	Regression; elevation and temperature	96	100×100
Wind speed maps	Average monthly synoptic station	96	100×100
potential ET maps	Regression; elevation and potential ET	96	100×100
Leaf area index maps	Estimated from Landsat 8 images	96	100×100

نخست نقشه‌های مرز حوزه، موقعیت ایستگاه‌ها و شبکه آبراهه‌ها، مدل رقومی ارتفاع، شیب منطقه و نقشه کاربری زمین با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS و ENVI تهیه شد. نقشه بافت خاک از شرکت آب منطقه‌ای البرز دریافت شد. با تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاع، سری زمانی نقشه‌های هم‌میزان تبخیر و دما با استفاده از رابطه رگرسیون این پارامترها با ارتفاع منطقه در محیط ArcGIS به صورت نقشه رستری با اندازه سلولی 100×100 متر تهیه شد. سپس سری زمانی نقشه‌های رستری بارش با استفاده از ادغام روش تیسسن و کریگینگ و عمق آب زیرزمینی با استفاده از روش

کریگینگ تهیه شد. برای تهیه نقشه رستری سرعت باد از داده‌های سرعت باد ایستگاه سینوپتیک قزوین استفاده شد. نقشه‌های آب برگشتی آبیاری، شرب، صنعت و فضای سبز نیز به کمک نقشه کاربری زمین و میزان مصارف آن‌ها تهیه شد. در مدل WetSpas، اثر تغییرات فصلی پوشش گیاهی بر بیلان آب از طریق شاخص سطح برگ (LAI) نشان داده می‌شود. به این منظور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست هشت و پس از انجام تصحیحات هندسی لازم روی آن‌ها در محیط نرم‌افزار ENVI شاخص سطح برگ (LAI) تهیه شد. سپس این نقشه‌ها وارد مدل WetSpas-M شد. دوره آماری این پژوهش هشت سال (۱۳۹۲-۱۳۹۹) است؛ که شش سال (۱۳۹۲-۱۳۹۷) برای دوره واسنجی و دو سال (۱۳۹۷-۱۳۹۹) برای دوره اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب از دو شاخص ضریب تبیین (R^2) و ضریب کارایی نش - ساتکلیف (NS) مطابق روابط (۱) و (۲) استفاده گردید.

۲.۳.۵. سناریوها

جدول (۶) مشخصات سناریوهای مورد استفاده در مطالعه را نشان می‌دهد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل WetSpas-M، از این مدل برای پیش‌بینی تغییرات تغذیه و بیلان آبی آبخوان در سال ۲۰۵۰ استفاده شد. نیاز آبی مصارف مختلف سناریوهای شش‌گانه نیز بر اساس تغییرات صورت گرفته در پارامترهای اقلیمی و کاربری‌های زمین مطابق جدول (۷) محاسبه شده است. از این نتایج به همراه نقشه‌های کاربری، جهت تولید نقشه‌های ورودی مدل WetSpas-M استفاده شد.

Table 6. Specifications of the scenarios used in this study

Row	Name Scenario	Description
S1	Reference	Without land use change and climate change
S2	RCP2.6	(Optimistic state of climate change)
S3	RCP8.5	Strict climate change aunt
S4	land use	Assuming land use changes in 2050
S5	land use+ RCP2.6	Combination of land use change and climate change
S6	land use+ RCP8.5	Combination of land use change and climate change

Table 7. Water requirement for different uses of six scenarios (million cubic meters per year)

Needs	S6	S5	S4	S3	S2	S1
Irrigation	349.4	332.4	302.8	327	310	290.4
Drink	40.2	40.2	40.2	19.9	19.9	19.9
Industry	14.8	14.8	14.8	7.25	7.25	7.2
Green Space	7.1	7	6.8	3.65	3.5	3.3
Sum	411.6	394.5	364.7	357.8	340.7	320.9

۳. نتایج و بحث

۳.۱. واسنجی و اعتبارسنجی مدل WetSpas-M

در فرایند واسنجی مدل از داده‌های ماهانه جریان در ایستگاه هیدرومتری ده‌صومعه به‌عنوان داده‌های مشاهداتی استفاده شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده شاخص ارزیابی ضرایب تبیین (R^2) و نش - ساتکلیف (NS) دبی برای واسنجی به‌ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۷۳ و برای صحت‌سنجی مدل ۰/۷۱ و ۰/۶۸ است. با توجه به شکل (۴) ملاحظه می‌شود که دبی شبیه‌سازی شده روند قابل‌قبولی با جریان رودخانه دارد. جدول (۸) مقادیر بهینه پارامترهای واسنجی شده مدل WetSpas-M نشان می‌دهد.

از سویی، برای کنترل تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی با مدل توزیعی تشریح‌شده در بخش روش پژوهش، از داده‌های تبخیر و تعرق برآورد شده با الگوریتم SEBAL نیز استفاده گردید که نتایج آن در شکل (۵) مشاهده می‌شود.

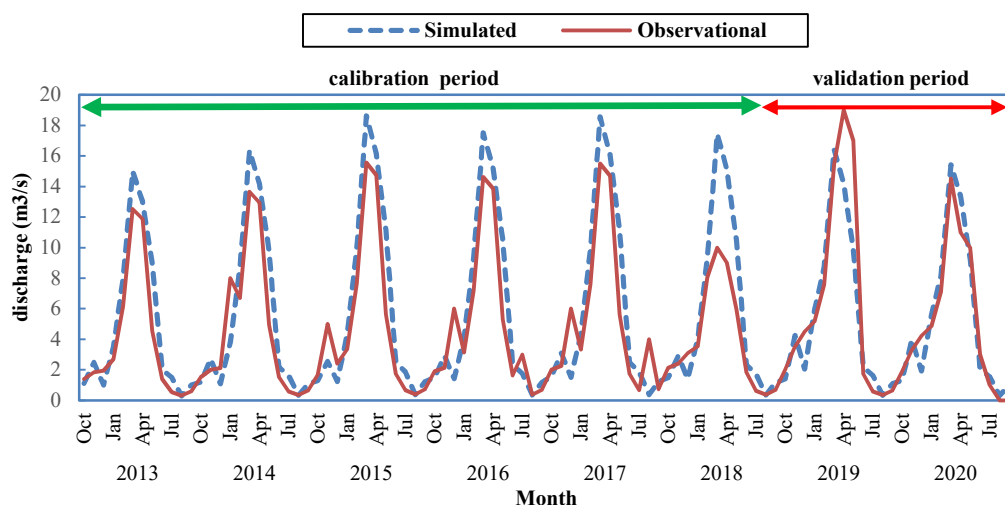


Figure 4. Comparison of the discharge simulated by the WetSpass-M model with the observed discharge of the Kordan River

Table 8. Optimal values of model calibration parameters in each sub-model of WetSpass model

Sub model	Acceptable range	Parameter	Optimal value
Interception	1- 20	a	8.5
Evapotranspiration	1- 20	α	6.5
Surface runoff	0.3- 3.5	Lp	0.85
Surface runoff	0- 1	X	0.25
Baseflow	0- 1	β	0.13
Recharge	0- 1	\emptyset	0.15

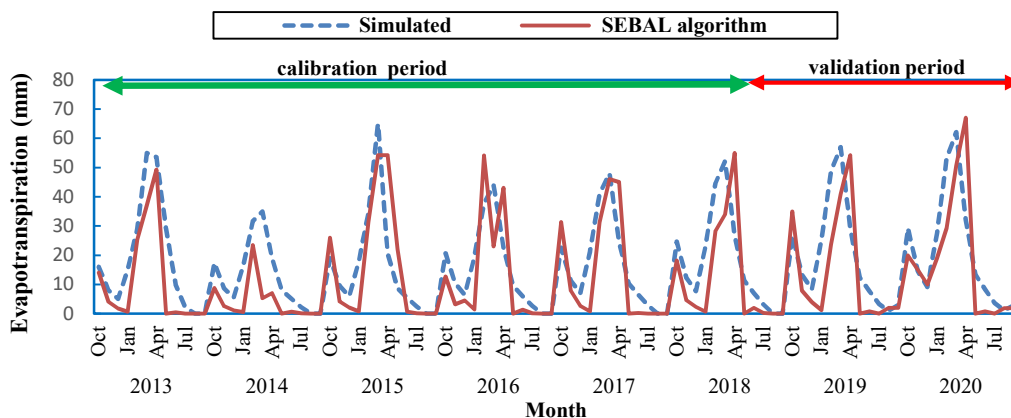


Figure 5. Evaporation rate simulated with WetSpass-M model and SSEB algorithm

در این راستا، نخست برای اعتبارسنجی تبخیر و تعرق برآوردشده با الگوریتم SEBAL از روش فائو- پنمن مانیتیت استفاده شد. با توجه به دقت بالا و همبستگی مناسب نتایج، در مرحله بعد داده‌های محاسبه‌شده تبخیر و تعرق با الگوریتم SEBAL و داده‌های تبخیر و تعرق برآوردشده با مدل توزیعی مورد ارزیابی قرار گرفت که مطابق شکل (۵) مشاهده می‌شود تبخیر و تعرق مدل و الگوریتم هم‌خوانی قابل‌قبولی دارد. برپایه نتایج شاخص ارزیابی R^2 و ENS تبخیر و تعرق برای دوره واسنجی به ترتیب 0.74 و 0.73 و برای دوره صحت‌سنجی 0.69 و 0.65 به دست آمد.

۲.۳. برآورد متغیرهای بیلان آب

پس از اعتبارسنجی مدل WetSpas-M از آن برای پیش‌بینی مؤلفه‌های تغذیه آب زیرزمینی، تبخیر و تعرق، رواناب و برگاب استفاده شد که نتایج آن‌ها در جدول (۹) جمع‌بندی و نقشه‌های تغذیه نیز در ۳۰ سال آتی برای شش سناریوی در شکل (۶) نشان داده شده است.

Table 9. Water balance components of Hashtgerd aquifer (MCM)

Cenarios	S6	S5	S4	S3	S2	S1
Rain	161.3	165.6	168.9	161.3	165.6	168.9
Discharge	411.7	394.5	364.7	357.9	340.7	320.9
Groundwater input	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7
Groundwater output	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6
Bargab	6.7	6.6	6.5	6.7	6.7	6.6
Runoff (caused by rain and irrigation)	36.3	39.1	40.7	27.3	30.2	32.3
Nutrition (caused by rain and return waters)	220.6	234.5	243.3	207.3	220.7	229.8
Evapotranspiration (caused by rain and irrigation)	354.0	340.6	318.1	320.4	307.1	291.3
Sum of input components	319.4	333.2	342.0	306.0	319.4	328.5
The sum of the output components	435.3	418.1	388.3	381.5	364.3	344.5
Aquifer balance changes	-115.9	-84.9	-46.3	-75.5	-44.9	-16.0

همان‌طور که مشاهده می‌شود به‌طور کلی در ارتفاعات به‌دلیل بارش بیشتر، سهم تغذیه آب زیرزمینی بیش‌تر بوده است. همچنین در مناطق کشاورزی آب برگشتی آبیاری باعث افزایش تغذیه آب زیرزمینی در این مناطق شده است. در مناطق مسکونی به‌دلیل کاهش تغذیه ناشی از بارش میزان تغذیه کاهش یافته اما این کاهش با تغذیه ناشی از آب برگشتی شرب، صنعت و فضای سبز در این مناطق جبران شده است. در ادامه به بررسی نتایج سناریوها پرداخته می‌شود.

۳.۳. بررسی نتایج سناریوها

۳.۳.۱. سناریوی یک (مرجع)

برپایه جدول (۸) در صورتی که وضعیت موجود تحت سناریوی یک ادامه پیدا کند، سطح تراز آب زیرزمینی به‌طور متوسط ۰/۶۵ متر در سال کاهش می‌یابد و در سال ۲۰۵۰ میزان تغذیه کل ناشی از بارش و آب برگشتی کشاورزی، شرب، صنعت و فضای سبز ۲۲۹/۸ MCM برآورد شده و بیلان سالیانه آب زیرزمینی MCM ۱۶- خواهد بود.

۳.۳.۲. سناریوی دو

در صورت انجام تغییرات اقلیمی با سناریوی RCP2.6، با کاهش بارندگی از یک‌سو و افزایش دما و تبخیر و تعرق از سوی دیگر، میزان نفوذ کاهش یافته و در نتیجه میزان تغذیه آبخوان کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش بارندگی و افزایش دما و تبخیر و تعرق، نیاز آبی کشاورزی افزایش یافته و میزان برداشت از چاه‌های آب زیرزمینی افزایش می‌یابد. هرچند بخشی از آن در قالب آب برگشتی آبیاری دوباره به آبخوان برمی‌گردد، اما در کل باعث افت بیش‌تر سطح آب زیرزمینی می‌شود. در این سناریو تغذیه نسبت به وضع موجود به مقدار ۲۲۰/۷ MCM کاهش و میزان برداشت چاه‌ها نیز افزایش می‌یابد که موجب می‌شود بیلان سالیانه در سال ۲۰۵۰ به ۴۴/۹ - میلیون مترمکعب در سال تغییر نماید.

۳.۳.۳. سناریوی سه

این سناریو همانند سناریو دو بوده و با بحرانی‌تر شدن تغییر اقلیم، میزان کاهش تغذیه و افزایش برداشت بیش‌تر شده و با بیلان MCM ۷۵/۵-، میزان تغذیه به ۲۰۷/۳ MCM در سال کاهش خواهد یافت.

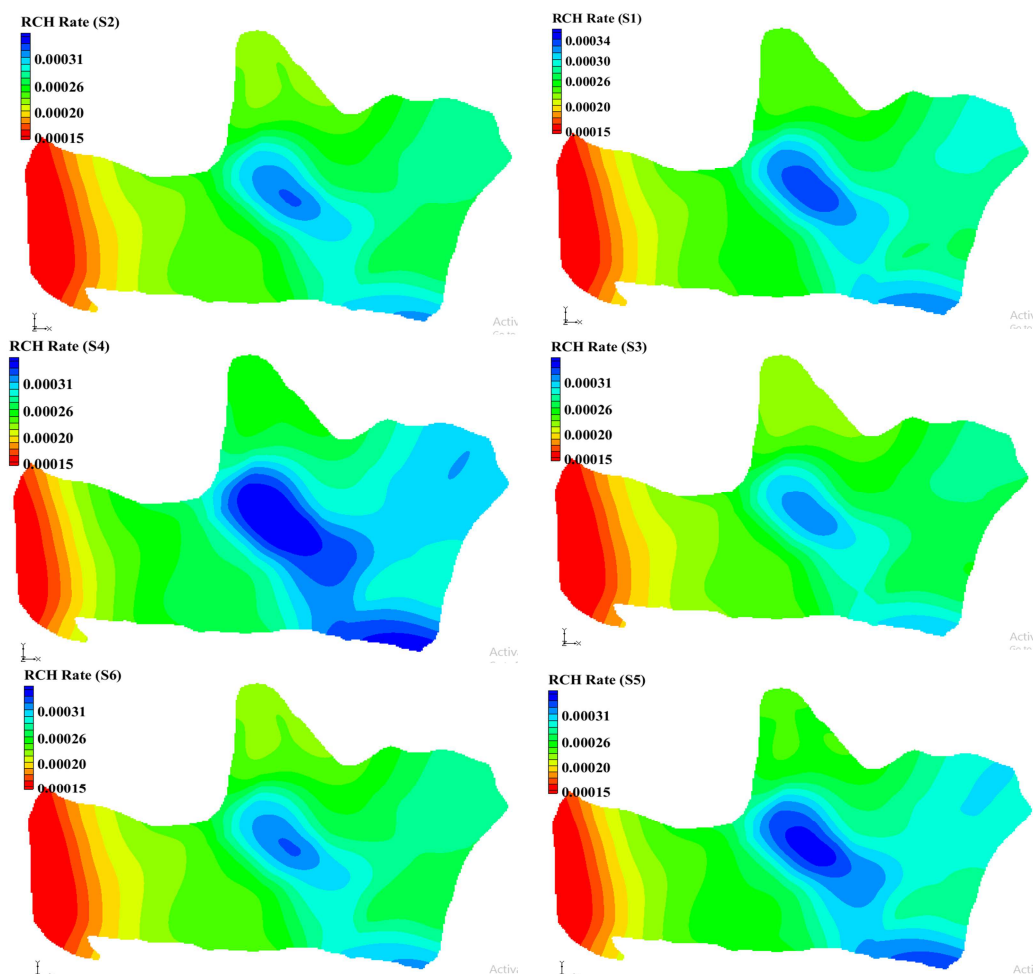


Figure 6. Distributional maps of Recharge in 2050 for six scenarios (mm/year)

۴.۳.۳ سناریوی چهارم

در صورت انجام تغییرات کاربری زمین، با افزایش کاربری‌های مسکونی و بایر و کاهش مرتع میزان نفوذپذیری زمین کاهش یافته و در نتیجه مقدار تغذیه سطحی آبخوان کاهش خواهد یافت. همچنین با افزایش کاربری‌های مسکونی و کشاورزی، نیاز آب شرب، صنعت و فضای سبز و نیاز آبی کشاورزی مطابق جدول (۷) افزایش یافته و میزان برداشت از چاه‌های آب زیرزمینی نیز مطابق جدول (۹) افزایش می‌یابد. هرچند بخشی از آن در قالب آب‌های برگشتی دوباره به آبخوان برمی‌گردد، اما در کل باعث افت بیش‌تر سطح آب زیرزمینی شده و منفی‌تر شدن بیلان می‌شود. در این سناریو به دلیل افزایش آب‌های برگشتی کشاورزی، شرب، صنعت و فضای سبز، در نگاه اول تغذیه مطابق جدول (۹) افزایش یافته است (۲۴۳ MCM)، ولی با افزایش میزان برداشت، در کل بیلان $46/3$ MCM - شده است.

۵.۳.۳ سناریوی پنجم

در این سناریوی با اعمال ترکیبی تغییر اقلیم و کاربری زمین مقدار افزایش برداشت بیش‌تر شده اما تغذیه به‌واسطه تغییر اقلیم، کاهش و به‌واسطه تغییر کاربری، افزایش یافته و به مقدار $234/5$ MCM خواهد رسید. در این سناریوی بیلان نیز کاهش بیش‌تری یافته و $84/9$ MCM - می‌شود.

۶.۳.۳. سناریوی شش

در این سناریوی نیز با اعمال بحرانی‌ترین شرایط تغییر اقلیم همراه با تغییر کاربری زمین، میزان کاهش تغذیه و افزایش برداشت بیش‌تر شده و با بیلان ۱۱۵ MCM-، میزان تغذیه به ۲۲۰ MCM در سال خواهد رسید. با توجه به متوسط ضخامت و مساحت آبخوان حجم آب کل آبخوان ۲۴۰۰ MCM برآورد می‌شود. در صورت وقوع سناریوی شش، سالانه ۱۱۵ MCM از ذخیره آبخوان کاسته شده و در عرض ۲۰ سال کل ذخیره آبخوان مصرف خواهد شد.

۴.۳. بررسی تغییرات مؤلفه‌های بیلان آب

با توجه به نتایج حاصله مطابق شکل (۷) مشاهده می‌شود تغذیه در سناریوهای دو و سه نسبت به سناریوی مرجع کاهش یافته که به دلیل کاهش بارندگی و افزایش دما و تبخیر و تعرق می‌باشد و در سناریوی چهار به دلیل افزایش آب‌های برگشتی کشاورزی، شرب، صنعت و فضای سبز افزایش پیدا کرده و در سناریوهای پنج و شش با ترکیب سناریوهای اقلیمی و کاربری تعدیل شده است. تبخیر و تعرق در تمامی سناریوها نسبت به سناریوی مرجع افزایش داشته است. در سناریوهای اقلیمی افزایش تبخیر و تعرق ناشی از افزایش دما و در سناریوی کاربری ناشی از افزایش رواناب و افزایش زمان تماس آب با نور خورشید بوده است. رواناب در سناریوهای اقلیمی به دلیل افزایش دما و کاهش بارش، کاهش داشته و در سناریوی کاربری به دلیل افزایش کاربری‌های بایر و مسکونی افزایش داشته است. برگاب تغییرات چندانی نداشته است. در کل در تمامی سناریوها با جلوگیری از جلوتر رفتن در سناریوها به ترتیب میزان برداشت افزایش و مقدار بیلان کاهش یافته است.

۵.۳. بررسی وضعیت بارش

مطابق شکل (۸) مشاهده می‌شود تبخیر و تعرق بیش‌ترین سهم از بارش را به خود اختصاص داده است. در سناریوی مرجع، تبخیر و تعرق ۴۹ درصد، تغذیه ۳۱ درصد، رواناب ۱۸ درصد و برگاب دو درصد از بارش را به خود اختصاص داده‌اند. این ترکیب در سناریوهای دیگر تغییر کرده و به مرور با جلوگیری از جلوتر رفتن در سناریوها سهم تبخیر و تعرق افزایش و سهم تغذیه و برگاب کاهش یافته است، اما سهم رواناب در سناریوهای اقلیمی کاهش و در سناریوی کاربری افزایش داشته است. در نهایت این تقسیم‌بندی در سناریوی شش برابر ۵۹/۲، ۱۸، ۲۱/۲ و ۱/۶ درصد به ترتیب برای تبخیر و تعرق، تغذیه، رواناب و برگاب شده است.

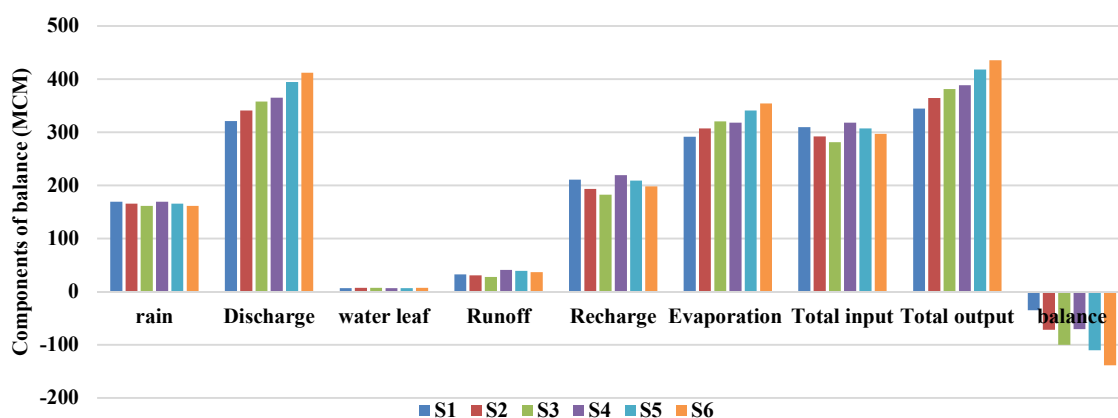


Figure 7. Comparison of simulated water balance components in different scenarios (MCM)

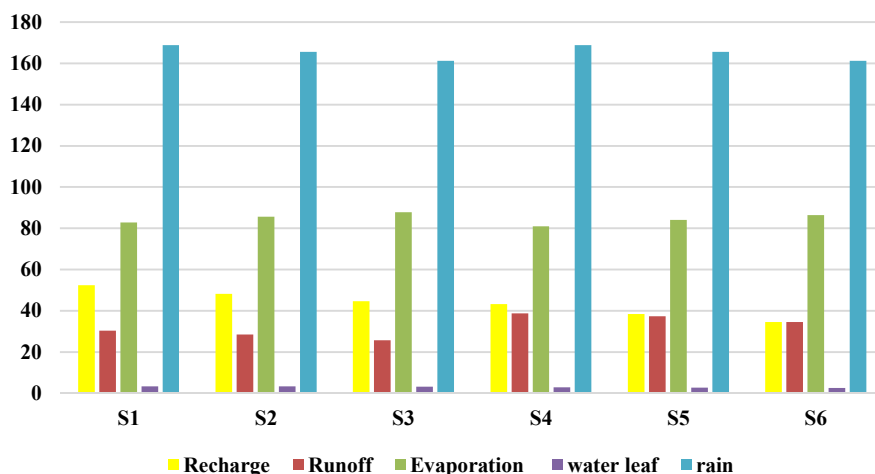


Figure 8. The rate of conversion of precipitation into its components in different scenarios (percentage)

شکل (۹) نیز درصد تغییرات تبخیر و تعرق، تغذیه، رواناب و برگاب ناشی بارش را در سناریوهای مختلف در سال ۲۰۵۰ نشان می‌دهد. میزان تغذیه ناشی از بارش در تمامی سناریوها کاهش یافته و با جلوتر رفتن در سناریوها درصد کاهش بیشتر شده است. میزان تبخیر و تعرق ناشی از بارش نیز در تمامی سناریوها افزایش یافته و با جلوتر رفتن در سناریوها درصد افزایش بیشتر شده است.

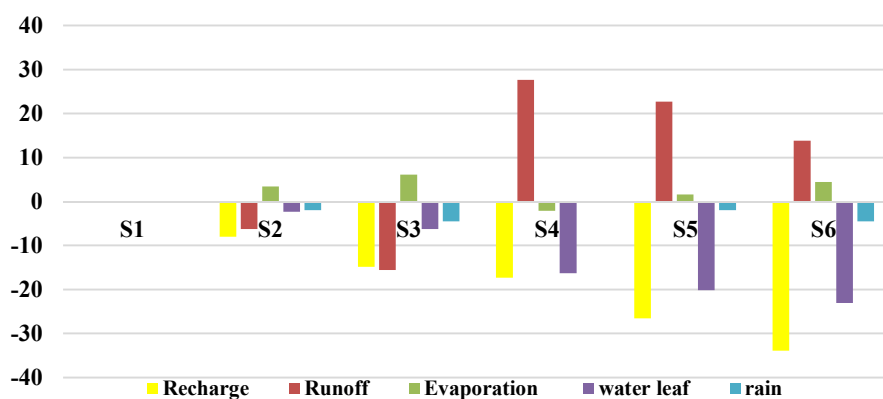


Figure 9. The percentage of precipitation changes and its components in different scenarios in 2050

۴. نتیجه‌گیری

نتایج تغییر اقلیم نشان‌دهنده کاهش متوسط بارش سالانه و افزایش متوسط دمای سالانه در دوره زمانی ۳۰ ساله بوده است. در این تغییرات، دما در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۱/۲ و ۳/۲ درجه سانتی‌گراد افزایش و بارش به ترتیب ۱/۹۵ و ۴/۴۷ درصد کاهش یافته است. این نتیجه با نتایج *Mehrazar et al.* (2018)، *Mortazavizadeh and Godarzi* (2018)، *Dubois et al.* (2021)، *Yifru et al.* (2021) و *Dau et al.* (2021) مطابقت دارد. نتایج تغییرات کاربری زمین طی دوره ۳۰ ساله حاکی از افزایش زمین مسکونی، بایر و کاهش مراتع است. زمین

مسکونی، بایر و کشاورزی به ترتیب ۱۰۵، ۴۱ و هشت درصد افزایش و مراتع ۹۴ درصد کاهش داشته است. این نتایج مشابه نتایج *Adhikari et al.* (2020)، *Ghimire et al.* (2021) و *Yifru et al.* (2021) است.

در سناریوهای اقلیمی (۲) و (۳) تغذیه نسبت به سناریوی مرجع به ترتیب به مقدار ۲۲۰/۷ و ۲۰۷/۳ میلیون مترمکعب در سال کاهش و بیلان آبخوان نیز به ترتیب به مقدار ۴۴/۹- و ۷۵/۵- میلیون مترمکعب در سال تغییر می‌نماید. این تغییرات ناشی از کاهش بارندگی و افزایش دما و تبخیر و تعرق بوده است. این نتیجه با نتایج *Dubois et al.* (2021) و *Dau et al.* (2021) هم‌خوانی دارد.

در سناریوی کاربری زمین، به دلیل افزایش آب‌های برگشتی، تغذیه به رقم MCM ۲۴۳ افزایش یافته، اما با افزایش میزان برداشت، در کل بیلان سالانه MCM ۴۶/۳- شده است. این نتیجه ناشی از افزایش کاربری‌های مسکونی و بایر و کشاورزی و کاهش مراتع بوده است. نتایج مشابهی توسط *Adhikari et al.* (2020)، *Ghimire et al.* (2021) و *Lamichhane and Shakya* (2020) در این خصوص گزارش شده است.

در سناریوهای ترکیبی پنج و شش تغذیه نسبت به سناریوی چهار (کاربری زمین) کاهش یافته و به ترتیب به مقدار ۲۳۴/۵ و ۲۲۰/۶ میلیون مترمکعب در سال رسیده و بیلان آبخوان نیز به ترتیب به مقدار ۸۴/۹- و ۱۱۵/۹- میلیون مترمکعب در سال تغییر خواهد نمود. در سناریوهای ترکیبی تغییر اقلیم و کاربری زمین مقدار افزایش برداشت بیش‌تر شده اما تغذیه به واسطه تغییر اقلیم، کاهش و به واسطه تغییر کاربری، افزایش داشته است. این نتیجه با نتایج *Tsarouchi and Buytaert* (2018)، *Ghimire et al.* (2021)، *Yifru et al.* (2021)، *Nair et al.* (2021) و *Yang et al.* (2019) هم‌خوانی دارد.

در سناریوی مرجع، تبخیر و تعرق ۴۹ درصد، تغذیه آب زیرزمینی ۳۱ درصد، رواناب ۱۸ درصد و برگاب دو درصد از بارش را به خود اختصاص داده‌اند. این درصدها در سناریوهای دیگر تغییر کرده و در سناریوی ترکیبی اقلیم و کاربری برابر ۵۹/۲، ۱۸، ۲۱/۲ و ۱/۶ درصد شده است. در همه سناریوها سهم تبخیر و تعرق افزایش و سهم تغذیه و برگاب کاهش یافته است، اما سهم رواناب در سناریوهای اقلیمی کاهش و در سناریوی کاربری افزایش داشته است. تبخیر و تعرق بیش‌ترین و برگاب کم‌ترین سهم از بارش را به خود اختصاص داده است. این نتیجه مشابه نتایج *Nannawo et al.* (2021) و *Yenehu et al.* (2021) است. به‌طور کلی در ارتفاعات به دلیل بارش بیش‌تر، سهم تغذیه آب زیرزمینی بیش‌تر بوده است. هم‌چنین در مناطق کشاورزی آب برگشتی آبیاری و در مسیر رودخانه کردان نیز، نفوذ آب رودخانه باعث افزایش تغذیه آب زیرزمینی شده است که مشابه نتایج *Mahmudi et al.* (2020) و *Babaei and Ketabchi* (2020) می‌باشد.

۵. پیشنهادها

در صورت وقوع تغییرات اقلیم و کاربری زمین، سالانه MCM ۱۱۵ از ذخیره آبخوان کاسته شده و در عرض ۲۰ سال کل ذخیره آبخوان مصرف خواهد شد. در این صورت تأمین مصارف آب کلیه نیازهای شرب، صنعت کشاورزی با مشکل مواجه خواهد شد. لذا پیشنهاد می‌شود به‌منظور جلوگیری از اثرگذاری تغییر اقلیم و کاربری زمین، مطالعاتی در خصوص ارائه راه‌کارهای سازگاری با این تغییرات از قبیل تغییر الگوی کشت، مطالعات کم آبیاری و ... انجام و در قالب سناریوهای مختلف مدیریتی بررسی شود.

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Abdollahi, K., Bashir, I., Verbeiren, B., Harouna, M.R., Griensven, A.V., Husmans, M., & Batelaan, O. (2017). A distributed monthly water balance model: formulation and application on Black Volta Basin. *Environ. Earth Sci. J.*, 76, 198. 1-18.
- Adhikari, R.K., Mohanasundaram, S., & Shrestha, S. (2020). Impacts of land-use changes on the groundwater recharge in the Ho Chi Minh City, Vietnam. *Environmental Research*. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109440.
- Aggarwal, S., Gary, V., Gupta, B., Nikman, R., & Thakur, P. (2012). Climate and land use change scenarios to study impact on hydrological regime. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, vol B8.
- Aslam, M., Salem, A., Singh, V., & Arshad, M. (2021). Estimation of spatial and temporal groundwater balance components in Khadir Canal Sub-Division, Chaj Doab, Pakistan. *Hydrology*, 8(4), 178.
- Andaryani, S., Nourani, V., Pradhan, B., et al. (2022). Spatiotemporal evaluation of future groundwater recharge in arid and semi-arid regions under climate change scenarios. *Hydrological Sciences Journal* 67, 6. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2050732>
- Arsanjani, J.J., Helbich, M., Kainz, W., & Darvishi Bolorani, A. (2013). Integration of Logistic Regression, Markov Chain and Cellular Automata Models to Simulate Urban Expansion, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 265-275. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.12.014>
- Babaei M., & Ketabchi, H. (2020). Estimation of groundwater recharge rate using a distributed model (Case study of Rafsanjan Aquifer, Kerman Province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(6), 1457-68 (In Persian)
- Bahri, M., et al. (2013). Evaluation of the effects of climate change and land use on hydrological reactions of watersheds (Case study: Eskandari watershed, Isfahan province). *Master Thesis, Faculty of Natural Resources, Yazd University*. (In Persian)
- Bashirian, F., Rahimi, D., Mohadi, S., & Zakarinejad, R. (2020). Simulating the runoff, evaporation, reabsorption and underground water feeding of Lake Urmia in wet and dry periods. *Iranian Water Research Journal*, 14(2- Serial 38), 85-95. (In Persian)
- Batelaan, O., & De Smedt, F. (2001). WetSpa: a flexible, GIS based, distributed recharge methodology for regional groundwater modeling. Impact of Human Activity on Groundwater Dynamics (Proceedings of a symposium held during the Sixth IAHS Scientific Assembly at Maastricht, The Netherlands, July 2001). *IAHS*, 269, 11-18.
- Boumaiza, L., Walter, J., Chesnaux, R., et al. (2022). Groundwater recharge over the past 100 years: Regional spatiotemporal assessment and climate change impact over the Saguenay-Lac-Saint-Jean region, Canada. *Hydrological processes*, 36, 3. <https://doi.org/10.1002/hyp.14526>
- Birhanu, A., Masih, I., van der Zaag, P., Nyseen, J., & CAI, X. (2019). Impacts of land-use and land cover changes on the hydrology of the Gumara catchment, Ethiopia. *Phys. Chem. Earth*, 112, 165-174. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.01.006>
- Chimdessa, K., Quraishi, S., Kebede, A., & Alamirew, A. (2019). Effect of Land-use Land Cover and Climate Change on River Flow and Soil Loss in Didessa River Basin, South West Blue Nile, Ethiopia. *Hydrology*, 6, 2. <https://doi.org/10.3390/hydrology6010002>
- Dau, Q.V., Momblanch, A., & Adeloje, A.J. (2021). Adaptation by Himalayan water resource system under a sustainable socioeconomic pathway in a high-emission context. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26 (3), 2021 Article number 04021003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002064](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002064)
- Dubois, E., Larocque, M., Gagné, S., & Braun, M. (2021). Climate Change Impacts on Groundwater Recharge in Cold and Humid Climates: Controlling Processes and Thresholds. *Climate*, 10, 6. <https://doi.org/10.3390/cli10010006>

- Ghimire, U., Shrestha, S., Neupane, S., *et al.* (2021). Climate and land-use change impacts on spatiotemporal variations in groundwater recharge: A case study of the Bangkok Area, Thailand. *Science of the Total Environment*, 792. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148370>
- Guptha, G.C., Swain, S., Al-Ansari, N., Taloor, A.K., & Dayal, D. (2021). Evaluation of an urban drainage system and its resilience using remote sensing and GIS. *Remote Sens Appl Soc Environ*, 23, 100601. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100601>
- Islam, K., Rahman, M.F., & Jashimuddin, M. (2018). Modeling land-use change using cellular automata and artificial neural network: The case of chunati wildlife sanctuary, Bangladesh. *Ecol. Indic.*, 88, 439-453. [DOI:10.1016/j.ecolind.2018.01.047](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.047)
- Lamichhane, S., & Shakya, N.M. (2020). Shallow aquifer groundwater dynamics due to land-use/cover change in highly urbanized basin: The case of Kathmandu Valley. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100707>
- Mahmoudi, Z., Bahreman, A., Abdollahi, K.h., Sadoddin, A., & Kouhestani, Sh. (2020). Investigation of temporal and spatial variations of water balance and separated hydrographs of the Arazkouse Watershed through groundwater recharge modeling using WetSpss model. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(1). [DOI: 10.22069/jwsc.2020.17733.3330](https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.17733.3330)
- Liaqat, M.U., Mohamed, M.M., *et al.* (2021). Impact of land use/land cover changes on groundwater resources in Al Ain region of the United Arab Emirates using remote sensing and GIS techniques. *Groundwater for Sustainable Development*, 14, 100587. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021>.
- Mango, L., Melesse, A., McClain, M., Gann, D., & Setegn, S. (2011). Landuse and climate change impacts on hydrology of upper Mara river basin, Kenya: Result of modeling study to support better resource management. *Hydrology and earth system sciences*, 15, 2245-2258.
- Marhaento, H., Booij, M.J., & Hoekstra, A.J. (2018). Hydrological response to future land-use change and climate change in a tropical catchment. *Hydrol. Sci. J.*, 63, 1368-1385. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1511054>
- Mehrazar, A., Massah Bavani, A., Mashal, M., & Rahimikhoob, H. (2018). Assessment of climate change impacts on agriculture of the Hashtgerd Plain with emphasis of AR5 models uncertainty. *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(3), 45-59.
- Mortazavizadeh, F. S., & Godarzi, M. (2018). Evaluation of climate change impacts on surface runoff and groundwater using HadGEM2 climatological model (case study: Hashtgerd). *Journal of Water and Soil*, 32(2), 433-446. <https://doi.org/10.22067/JSW.V32I2.67160>
- Nannawo, A.S., Lohani, T.K., & Eshete, A.A. (2021). Exemplifying the effects using WetSpss model depicting the landscape modifications on long-term surface and subsurface hydrological water balance in Bilate Basin, Ethiopia. *Advances in Civil Engineering*.
- Nair, S.C., & Mirajkar, A. (2021). Land use-land cover anomalies and groundwater pattern with climate change for Western Vidarbha: a case study. *Arabian Journal of Geosciences* 14, Article number: 452 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06823-y>
- Noszczky, T. (2019). A review of approaches to land use changes modeling. *Hum. Ecol. Risk Assess*, 25, 1377-1405. [CrossRef]
- Orozco, I., Martínez, A., & Ortega, V. (2020). Assessment of the Water, Environmental, Economic and Social Vulnerability of a Watershed to the Potential Effects of Climate Change and Land Use Change. *Journal water*. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/6/1682>.
- Purandara, B. K., Venkatesh, B., Jose, M. K., & Chandramohan, T. (2018). Change of Land Use/Land Cover on Groundwater Recharge in Malaprabha Catchment, Belagavi, Karnataka, India. *Part of the Water Science and Technology Library book series (WSTL, volume 76)*.
- Rasaei, A.H., Sharafati, A., & Kardan Moghaddam, H. (2020). Analysis of Groundwater Uncertainty in Climate Change (Case study: Hashtgerd Plain) *Journal of Ecohydrology*, 7 (3), 815-827. (In Persian).

- Regional Water Company of Tehran. (2011). Geology, semi-detailed studies of Hashtgerd Plain. *Iran Water Resources Management Company*, Ministry of Energy. (In Persian)
- Regional Water Company of Tehran. (2013). Updating water resources studies report of Namak Lake basin. *Iran Water Resources Management Company*, Ministry of Energy. (In Persian)
- RIWEM (Research Institute Water Engineering Management). (2021). Study for identification of uncertainties and errors in estimation of water balance components and providing the appropriate solutions. Research Institute Water Engineering Management, Tarbiat Modares University, Regional Water Company of Alborz. (In Persian)
- Sundara Kumar, K., Udaya Bhaskar, P., & Padmakumari, K. (2016). Application of Markov chain and cellular automata model for prediction of urban transitions, International conference on Electrical Electronics and Optimization Techniques (ICEEOT-2016), *IEEE-Explore*, 4007-4012.
- Swain, S., Mishra, S.K., & Pandey, A. (2020a) Assessment of meteorological droughts over Hoshangabad district, India. In: IOP conference series: earth and environmental science, IOP Publishing, 491(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/491/1/012012>
- Swain, S., Sharma, I., Mishra, S.K., Pandey, A., Amrit, K., & Nikam, V. (2020b). A framework for managing irrigation water requirements under climatic uncertainties over Beed district, Maharashtra, India. In: World environmental and water resources congress 2020b: water resources planning, management, irrigation, and drainage, VA: ASCE, Reston, pp 1-8. <https://doi.org/10.1061/9780784482957.001>
- Tamm, O., Maasikamäe, S., Padari, A., & Tamm, T. (2018). Modelling the effects of land use and climate change on the water resources in the eastern Baltic Sea region using the SWAT model. *Catena*, 167, 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.029> Get rights and content Highlights.
- Tsarouchi, G., & Buytaert, W. (2018). Land-use change may exacerbate climate change impacts on water resources in the Ganges basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 1411-1435, 2018. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1411-2018>
- Yang, W., Long, D., & Bai, P. (2019). Impacts of future land cover and climate changes on runoff in the mostly afforested river basin in North China. *Journal of Hydrology*, 570, 201-219. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.055>
- Yenehun, A., Dessie, M., *et al.* (2022). Spatial and temporal simulation of groundwater recharge and cross-validation with point estimations in volcanic aquifers with variable topography. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 42 (2022) 101142.
- Yifru, B.A., Chung, M., Kim, M., & Chang, S.W. (2021). Assessing the Effect of Land/Use Land Cover and Climate Change on Water Yield and Groundwater Recharge in East African Rift Valley using Integrated Model. *Journal of Hydrology*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100926>