



The Effects of Climate Change on Water Resources and Agricultural Systems in the Context of Regional Risk Assessment (Case Study: Lake Zarebar Basin)

Z. Farmanbar¹, M. Delavar^{2*}
and S. Imani Amirabadi³

Abstract

Climate Change and prediction of its impacts on Earth's system is an important issue in order to reduce the vulnerability and to have appropriate measures to deal with it. In this context, deep uncertainty is the key factor in Climate Change studies. In this study we used the regional risk assessment framework (RRA) to integrate assessment of river basin situation considering deep uncertainties. In this regard, the Zrebar Lake basin was selected as a case study for assessing the proposed methodology. The calibrated SWAT model was used for simulation of the Zrebar Lake basin in the base and climate change condition. The downscaled outputs of RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 emission scenarios of nine GCM models in three projected periods (2011-2040 and 2041-2070 and 2071-2100) were entered into the model to simulate the effects of climate change. After assessing changes in vulnerable factors in Zarebar Lake basin in order to improve the condition of these factors, adaptation strategies were evaluated with regional risk assessment framework. The results showed that the mean annual temperature was increased by 0.3°C in the first projection period, by 0.6°C in the second projection period and by about 1°C by the end of the twenty-first century. Also the mean annual precipitation in the three projected periods was increased respectively by about 38.5, 66.0 and 87.1 mm. Assessment of the climate change impacts on risk receptors showed that the crop yield and the recharge of aquifers faced the greatest damage under climate change condition. Also, rainfed wheat dealt with more damage compared to other crops. The results indicated the need for appropriate infrastructure in order to cope with the effects of the climate change.

Keywords: Climate Change, Regional Risk Assessment, Zarebar Lake, SWAT.

Received: February 25, 2017

Accepted: June 14, 2017

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر سیستم‌های منابع آب و کشاورزی در چارچوب ارزیابی ریسک منطقه‌ای (مطالعه موردی: حوضه دریاچه زریبار)

زهرا فرمانبر^۱، مجید دلاور^{۲*} و سمیه ایمانی امیرآبادی^۳

چکیده

پدیده تغییر اقلیم و پیش‌بینی اثرات آن بر کره زمین به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری و مقابله با آن از اهمیت بسزایی برخوردار است. از جمله موضوعات مهم در مطالعات تغییر اقلیم، عدم قطعیت این پدیده و تحلیل چشم‌انداز آتی متغیرها در این شرایط است. در این مطالعه تلاش گردید با استفاده از روش ارزیابی ریسک منطقه‌ای (RRA) به بررسی جامع شرایط حوضه‌های آبریز در شرایط عدم قطعیت نتایج مدل‌های گردش عمومی و سناریوهای انتشار پرداخته شود. بدین منظور حوضه دریاچه زریبار به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید. در این راستا از مدل واسنجی شده SWAT برای شبیه‌سازی حوضه در شرایط تغییر اقلیم استفاده شد. برای تحلیل چشم‌انداز تغییر اقلیم خروجی‌های ریز مقیاس شده سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 از مدل GCM در دوره مینا (۲۰۰۵-۱۹۷۶) و سه دوره پیش‌بینی (۲۰۱۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰) جهت پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم در حوضه مورد مطالعه به مدل وارد گردید. نتایج حاصل از بررسی خروجی‌ها نشان می‌دهد که مقدار میانگین سالانه دما در دوره اول 0.3°C ، در دوره دوم 0.6°C و دوره سوم 1°C درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. همچنین، میانگین سالانه بارش در منطقه در سه دوره به ترتیب 38.5 ، 66.0 و 87.1 میلی‌متر افزایش خواهد یافت. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر گیرنده‌های خطر در حوضه زریبار در چارچوب ارزیابی ریسک منطقه‌ای نشان دهنده این است که عملکرد محصولات کشاورزی و تغذیه آبخوان در معرض بیشترین آسیب ناشی از این پدیده هستند. گندم در میان محصولات کشت شده در منطقه بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات پیش‌بینی شده نشان داده است. این نتایج همگی لزوم بسترسازی‌های مناسب در منطقه جهت سازگاری با اثرات تغییر اقلیم را تأکید می‌کند.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، ارزیابی ریسک منطقه‌ای، دریاچه زریبار،

SWAT

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۱۲/۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۳/۲۴

1- MSc Student, Water Resources Engineering Department, College of Agriculture, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran

2-Assistant Professor, Water Resources Engineering Department, College of Agriculture, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran. Email: m.delavar@modares.ac.ir

3- MSc Graduate of Water Resources Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده تربیت مدرس، تهران، ایران

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان خرداد ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

گردش عمومی جو از گزارش پنجم IPCC اثرات تغییر اقلیم در این حوضه را مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله سه سناریو RCP برای مدل‌های انتخاب شده استفاده شدند و بر اساس هریک از این سه سناریو اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش در حوضه مورد مطالعه برای دو چشم‌انداز ۲۰۴۶-۲۰۶۵ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان دهنده افزایش دما و بارش و به تبع آن افزایش احتمال وقوع سیل در حوضه هستند. (Feng (2014) با استفاده از ۱۲ مدل گردش عمومی جو از گزارش پنجم IPCC تغییر در رژیم‌های آب‌وهوایی را مورد بررسی قرار داد. با توجه به سناریو RCP8.5 مدل‌ها ۳ تا ۱۰ درجه افزایش دما تا پایان قرن بیست و یکم را پیش‌بینی کرده‌اند. همچنین، برای عرض‌های بالایی کره زمین افزایش بارش پیش‌بینی شده است. در مطالعه‌ای (Sharmila et al. (2015 اثرات تغییر اقلیم در هند را مورد بررسی قرار دادند. پیش‌بینی‌های ۲۰ مدل انتخاب شده نشان می‌دهد که تغییرات قابل توجهی در بارش‌های موسمی تابستانه در هند تا اواخر قرن بیست و یکم رخ خواهد داد که حساسیت شدید این بارش‌ها به گرم شدن جهانی را اثبات می‌کند. در خصوص بررسی اثرات تغییر اقلیم بر آب‌های زیرزمینی دلتای مکونگ مطالعه‌ای توسط (Shrestha et al. (2016 انجام گرفت. در این تحقیق برای پیش‌بینی شرایط آینده منابع آب زیرزمینی از دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شده است. پیش‌بینی‌ها در خصوص تغذیه آب‌های زیرزمینی نشانگر کاهش آن در کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت است. در نتیجه پیش‌بینی شده است که سطح آب زیرزمینی و ذخیره آن در آینده کاهش یابد.

یکی از مسائل مطرح در مطالعات تغییر اقلیم، مسئله عدم قطعیت و نحوه ارزیابی اثرات و تصمیم‌گیری در این شرایط می‌باشد. عدم قطعیت‌های این پدیده می‌تواند به طور عمده ناشی از مدل‌های گردش عمومی جو، سناریوهای انتشار، مدل‌های شبیه‌ساز اثرات و پارامترهای واسنجی شده آن‌ها باشد. از جمله راهکارهای مورد استفاده جهت تحلیل این عدم قطعیت‌ها استفاده از چارچوب‌های ارزیابی ریسک می‌باشد. استفاده از این چارچوب‌ها امکان ارزیابی چشم‌انداز اثرات ناشی از تغییر اقلیم در فضای غیر قطعی حاکم بر پدیده با در نظر گرفتن دامنه وسیع تغییرات متغیرهای هدف را فراهم می‌کند. چارچوب ارزیابی ریسک منطقه‌ای که اولین بار در سال (2009) در مطالعات سازمان ملل UNEP ارائه گردید از جمله رویکردهای مطرح در ارزیابی جامع ریسک اثرات تغییر اقلیم می‌باشد که با شناسایی و تعریف مؤلفه‌های مؤثر در ریسک شامل خطرات ناشی از تغییر اقلیم، تهدیدها و حدود خطر و حساسیت پذیرنده‌های خطر ارزیابی جامعی از میزان ریسک و آسیب‌پذیری سیستم‌های تأثیرپذیر از تغییر اقلیم را فراهم می‌کند. این رویکرد در مطالعات محدودی به منظور بررسی شرایط

تغییر اقلیم یعنی هر تغییر مشخص در الگوهای مورد انتظار برای وضعیت میانگین آب و هوایی، که در طولانی مدت در یک منطقه خاص یا برای کل اقلیم جهانی، رخ بدهد. تغییر اقلیم نشان دهنده تغییرات غیرعادی در اقلیم درون اتمسفر زمین و پیامدهای ناشی از آن در قسمت‌های مختلف کره‌ی زمین می‌باشد. بررسی اثرات تغییر اقلیم به منظور ارزیابی میزان آسیب‌پذیری بخش‌های مختلف ناشی از این پدیده و تعیین اقدامات مناسب سازگاری از اهمیت ویژه‌ای در مطالعات تغییر اقلیم در حوضه‌های آبریز برخوردار است. در این راستا مدل‌سازی به عنوان یکی از ابزارهای مطرح برای شبیه‌سازی و بررسی چشم‌انداز اثرات تغییر اقلیم می‌باشد که در مطالعات مختلف مورد توجه قرار گرفته است. در این زمینه استفاده از مدل‌های جامع شبیه‌سازی حوضه آبریز به دلیل قابلیت آن‌ها در شبیه‌سازی اثرات متقابل مؤلفه‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی از توجه ویژه‌ای برخوردار است. به منظور مقایسه مدل SWAT با مدل‌های دیگر در مقیاس حوضه Berah and Borah (2003) مطالعه‌ای را انجام دادند. آن‌ها پس از مقایسه ۱۱ مدل هیدرولوژیکی مدل SWAT را از مفیدترین مدل‌ها جهت شبیه‌سازی دراز مدت حوضه‌های کشاورزی معرفی کردند. در مطالعه‌ای در حوضه‌ای در شرق پنسیلوانیا نشان داده شد که مدل SWAT در برآورد جریان فصلی دقیق‌تر است و این مدل برای اعمال سناریوهای مختلف مناسب‌تر می‌باشد (Srinivasan et al., 2005). به منظور شناسایی مناطق بحرانی از لحاظ مواد مغذی در دریاچه زریبار (Imani (2017) از مدل SWAT جهت شبیه‌سازی حوضه آبریز استفاده و پس از شناسایی این مناطق بهترین اقدامات مدیریتی جهت کاهش بار آلاینده در حوضه را با استفاده از این مدل مورد بررسی قرار داد.

بسیاری از مطالعات بر مبنای مشاهدات و مدل‌سازی نشان می‌دهد که افزایش غلظت CO₂ و تغییر اقلیم اثرات قابل توجهی بر چرخه هیدرولوژیکی دارد (Gedney et al., 2006; Jackson et al., 2001; Jha et al., 2006; Koster et al., 2004; Labat et al., 2004; Piao et al., 2009; Schaake, 1990; Wu et al., 2012; Zhou et al., 2011) این اثرات را در یک حوضه مشخص می‌توان با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی با سناریوهای فرضی مختلف و یا اطلاعات به‌دست آمده از مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) شبیه‌سازی نمود. آخرین مدل‌های گردش عمومی و سناریوهای تغییر اقلیم در سال ۲۰۱۳ در گزارش پنجم IPCC مورد بازبینی قرار گرفته است که مطالعات متعددی با استفاده از خروجی‌های این گزارش صورت گرفته است. (Su et al. (2016) در مطالعه‌ای در خصوص تغییر اقلیم در حوضه رودخانه Indus با استفاده از خروجی‌های ۱۱ مدل

با تلفیق نتایج متنوع حاصل از برون‌داد مدل‌های اقلیمی و مدل‌های شبیه‌سازی پیوسته با چارچوب ارزیابی ریسک منطقه‌ای، به تحلیل چندجانبه و جامع وضعیت سیستم‌های منابع آب (اعم از سطحی و زیرزمینی) و کشاورزی حوضه‌های آبریز در شرایط عدم قطعیت تغییر اقلیم بپردازد. بدین منظور ارزیابی شرایط هیدرولوژیکی، کیفیت منابع آب و کشاورزی با استفاده مدل SWAT و با توجه به برون‌دادهای ۹ مدل گردش عمومی جو انجام شد و نتایج حاصل در چارچوب ارزیابی ریسک منطقه‌ای مورد تحلیل قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

به طور کلی مطالعه حاضر دارای سه مرحله اصلی می‌باشد. در مرحله اول خروجی‌های مدل‌های GCM ارائه شده در جدول ۱ جهت استفاده در مدل شبیه‌سازی با استفاده از روش عامل تغییر ریزمقیاس شده سپس در مرحله دوم به منظور شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم برون‌دادهای آماده شده در مدل SWAT وارد و در مرحله آخر نتایج به دست آمده از مدل در چارچوب ارزیابی ریسک منطقه‌ای وارد شده‌اند. مراحل کلی سه گانه تحقیق در شکل ۱ نشان داده است.

۲-۱- منطقه مطالعاتی

دریاچه زریبار در حدود ۲۰۰۰ هکتار مساحت و در فاصله ۳ کیلومتری غرب شهر مریوان، در کردستان ایران قرار گرفته است. حوضه این دریاچه در مختصات جغرافیایی $35^{\circ}30'31''$ تا $35^{\circ}37'06''$ عرض شمالی و $46^{\circ}03'52''$ تا $46^{\circ}10'47''$ طول شرقی واقع شده است و ارتفاع آن از حدود ۱۲۷۰ تا ۲۸۱۸ می‌باشد. مساحت این حوضه با احتساب دریاچه در حدود ۸۹ کیلومتر مربع می‌باشد.

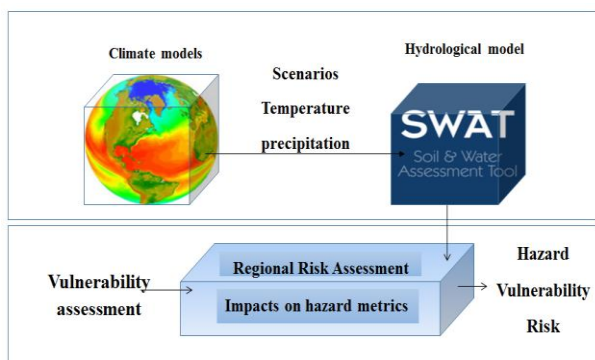


Fig. 1- The research framework

شکل ۱- نمای کلی از مراحل تحقیق

سیستم‌های منابع آبی مورد استفاده قرار گرفته است. به این منظور Pasini et al. (2012) جهت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی دو دشت ونتو از چارچوب ارزیابی ریسک منطقه‌ای استفاده کردند و ریسک و آسیب‌های ناشی از تغییر اقلیم را در این منطقه مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه مناطق مختلف این دشت بر اساس میزان در معرض خطر بودن رتبه‌بندی شدند. اثرات مربوط به آب‌های سطحی و زیرزمینی در هر بخش شناسایی شده و آنالیز حساسیت و ارزیابی ریسک روی آن‌ها انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد ۸۰ درصد مناطق کشاورزی و ۲۷ درصد از آب‌های زیرزمینی در معرض خطر شدید هستند. نتایج این مطالعه حاکی از کارایی مناسب روش ارزیابی ریسک منطقه‌ای در تحلیل مکانی و جامع اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی می‌باشد. همچنین در مطالعه دیگری با استفاده از این چارچوب به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر کمیت و کیفیت سفره‌های آب زیرزمینی و سیستم‌های مرتبط با آن (چاه‌ها، رودخانه‌ها، مناطق کشاورزی دریاچه‌ها و ...) در حوضه رودخانه Esino در ایتالیا پرداخته شده است (Iyalomhe et al., 2015). نتایج نیز حاکی از توانمندی روش در تحلیل چند جانبه اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی می‌باشد. این مطالعه نشان می‌دهد که کاهش سطح آب زیرزمینی در شرایط تغییر اقلیم اثرات محدودی بر مناطق کشاورزی، جنگل‌ها و محیط‌های طبیعی دارد که تنها ۵ درصد از کل سطح مورد مطالعه را شامل می‌شود. همچنین مطالعه پیشروی آب شور نیز نشان می‌دهد که پیشروی تنها به چند صد متر محدود می‌شود که پیامد خاصی برای فعالیت‌های انسانی ندارد. مطالعات انجام شده در زمینه بکارگیری چارچوب ارزیابی ریسک منطقه‌ای در حوزه منابع آب محدود به کاربرد این چارچوب در تحلیل وضعیت منابع آب زیرزمینی و تبعات ناشی از تغییرات کمی و کیفی این منابع می‌باشد. لذا با توجه به آنچه بدان اشاره شد، تحقیق حاضر تلاش دارد تا با رویکردی گسترده‌تر و

Table 1- List of the global climate models used in this study

جدول ۱- مدل‌های GCM مورد استفاده		
Model	Country	Resolution
BCC-CSM 1-1	China	128*64
CNRM-CM5	France	256*128
CSIRO-MK3-6-0	Australia	192*96
GFDL-ESM2M	US	144*90
HadGEM2-AO	Korea	192*145
IPSL-CM5A-LR	France	96*96
MIROC5	Japan	256*128
MPI-ESM-LR	Germany	192*96
NorESM1-M	Norway	144*96

آبراهه‌ای و زیر حوضه‌های آبریز دریاچه زریبار با استفاده از نقشه توپوگرافی منطقه انجام گرفت. برای شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی رخ داده در سطح حوضه مدل حوضه را به قسمت‌های کوچکی به نام واحدهای هیدرولوژیکی (HRU) تقسیم می‌کند. با توجه به خصوصیات منطقه تعداد ۲۶ زیر حوضه و ۱۰۰۰ واحد هیدرولوژیکی برای حوضه دریاچه زریبار به دست آمد. همچنین، سایر اطلاعات از قبیل اطلاعات اقلیمی و اطلاعات مدیریتی با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده برای منطقه به مدل وارد گردید.

۲-۳- ارزیابی ریسک منطقه‌ای

به منظور بررسی شرایط و وضعیت حوضه تحت اثر تغییر اقلیم از روش ارزیابی ریسک منطقه‌ای استفاده شده است. روش در نظر گرفته شده دارای ۶ گام است که در فلوچارت شکل ۳ آورده شده است.

گام اول در ارزیابی ریسک منطقه‌ای تعیین ماتریس ریسک منطقه است. در این تحقیق اثر تغییر اقلیم بر سیستم آبی حوضه آبریز از دو منظر کمی و کیفی بررسی می‌شود. به همین دلیل جهت تعریف ماتریس ریسک این دو بخش به صورت مجزا در نظر گرفته می‌شود. ماتریس ریسک تمام اجزا مؤثر در خطر از جمله عوامل استرس‌زا، گیرنده‌های خطر و اثرات آن‌ها و همچنین رابطه بین این اجزا را نشان می‌دهد. ماتریس ریسک منطقه‌ای از دو زیر ماتریس آسیب‌پذیری و ماتریس خطر تشکیل می‌شود که نمونه آن در جدول ۲ و جدول ۳ دیده می‌شود.

وجود زمین‌های حاصلخیز در حاشیه دریاچه و وفور نسبی آب عامل اصلی گسترش کشاورزی در این منطقه می‌باشد. عمده محصولاتی که به صورت آبی و دیم در زمین‌های زراعی حاشیه رودخانه کاشته می‌شوند شامل گندم، جو، گوجه‌فرنگی، یونجه و تنباکو می‌باشند. در شکل ۲ موقعیت منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. در این تحقیق از اطلاعات روزانه دما ایستگاه سینوپتیک مریوان و ایستگاه اقلیم سنجی سروآباد و اطلاعات بارندگی ایستگاه سینوپتیک مریوان و ایستگاه‌های باران‌سنجی دریاچه زریبار، چناره، دزبل و ساوجی و ایستگاه اقلیم سنجی سروآباد استفاده شد.

۲-۲- شبیه‌سازی اثرات کمی و کیفی تغییر اقلیم بر سیستم آبی حوضه آبریز

در این مطالعه جهت شبیه‌سازی حوضه آبریز از مدل SWAT استفاده شده است. این مدل توسط Arnold et al. (1998) توسعه یافته است. مدل SWAT یک مدل نیمه توزیعی است که از جمله مدل‌هایی است که توانایی شبیه‌سازی اثرات همزمان اقدامات مختلف مدیریتی آب (مقدار آبیاری، دوره آبیاری و غیره)، کشاورزی (کود دهی، شخم‌زنی و غیره)، در خصوص بسیاری از متغیرهای هیدرولوژیکی (تبخیر و تعلق پتانسیل و واقعی، دبی، رطوبت خاک، آب‌های زیرزمین و غیره)، گیاهی (عملکرد و غیره) و کیفی (نیترات، فسفات و غیره) را در مقیاس حوضه دارا است. توپوگرافی، مشخصات خاک، کاربری اراضی، نوع پوشش گیاهی، اطلاعات هواشناسی و شیوه‌های مدیریت زمین از جمله ورودی‌های اصلی مدل هستند. پیکره‌بندی مدل جهت استخراج شبکه

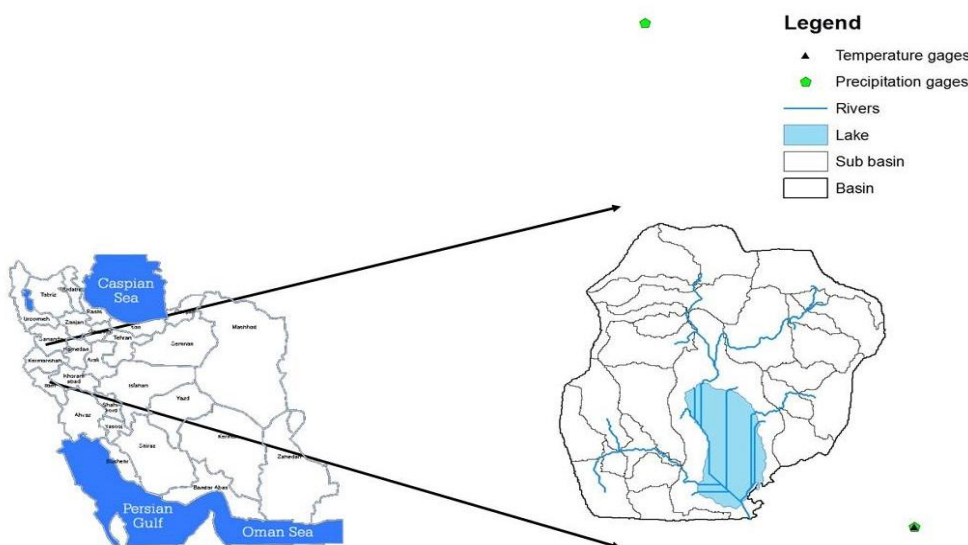


Fig. 2- Case study area
شکل ۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه

به ترتیب با توجه به معادلات (۱) و (۲) برای هر کدام از اثرات مشخص شده تغییر اقلیم به هم مرتبط می‌شوند.

$$E_{x,s} \begin{cases} 0 & pf_1 > s_1 \\ \min\left(\frac{pf_1 + h_{x,s}}{s_1}, 1\right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{y,s} \begin{cases} 0 & h_{y,s} = 0 \\ \max\left(1 - \frac{pf_2 - h_{y,s}}{s_2}, 0\right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

که در رابطه (۱) $h_{x,s}$ تفاوت مثبت بین مقدار پیش‌بینی شده برای عامل تحت تأثیر x تحت سناریو s و مقدار کنونی، pf_1 مقدار کنونی عامل تأثیر x ، s_1 حد آستانه مشخص شده برای عامل تأثیر x از نظر کمی و در رابطه (۲) $h_{y,s}$ تفاوت مثبت بین مقدار پیش‌بینی شده برای عامل تحت تأثیر x تحت سناریو s و مقدار کنونی، pf_2 مقدار کنونی عامل تحت تأثیر x ، s_2 حد آستانه مشخص شده تأثیر عامل تحت تأثیر x از نظر کیفی می‌باشند. در این مرحله مقادیر میانگین هریک از مؤلفه‌ها در دوره مینا به عنوان مقدار آستانه مورد استفاده در روابط ذکر شده در نظر گرفته شده است. نتایج خروجی ارزیابی تهدید برای اثرات کمی و کیفی بین مقادیر صفر تا یک هستند. عدد صفر مربوط به اثرات و مناطقی که با خطر طبیعی مواجه نیستند و عدد یک مربوط به بیشترین خطر طبیعی برای آن‌هاست.

مرحله ارزیابی حساسیت با استفاده از فاکتورهای حساسیت مشخص شده در ماتریس آسیب‌پذیری گام اول صورت می‌گیرد. این عوامل بر اساس مطالعات در گروه‌های مختلف تقسیم‌بندی و رتبه‌دهی می‌شوند. رتبه‌بندی صورت گرفته برای هریک از مؤلفه‌ها به این صورت انجام شده است که در ابتدا کمترین و بیشترین مقدار ممکن برای هریک از مؤلفه‌ها در منطقه مورد مطالعه استخراج شده و محدوده بین این دو مقدار بر اساس میزان اهمیت آن به چندین کلاس تقسیم شده و به هریک از کلاس‌ها رتبه‌ای اختصاص داده شده است. رتبه‌ها از صفر (بدون آسیب‌پذیری) تا یک (آسیب‌پذیری کامل) متغیر است. در نهایت مقادیر حساسیت با استفاده از تابع زیر جمع می‌شوند.

$$S_k = \otimes_i^n [sf_{i,k}] \quad (3)$$

در این رابطه S_k درجه حساسیت عامل به اثر K ، \otimes = توابع احتمال شرطی و $sf_{i,k}$ مقدار نرمال شده حساسیت به اثر K می‌باشد. این تابع بر اساس اجرای مدل شبیه‌سازی با استفاده از ترکیبی از خروجی‌های مدل‌های AOGCM تحت سناریوهای مختلف انتشار و به‌کارگیری روش میانگین‌گیری بیزی (BMA) محاسبه می‌شود. در این روش فرض می‌شود که تمامی مدل‌ها مفید بوده و قابلیت استفاده در شبیه‌سازی را دارد ولی درجه اعتماد به آن‌ها متفاوت است که توسط وزن هریک از آن‌ها بر مبنای میزان مشابهت آن‌ها در دوره پایه، مشخص می‌گردد. در اینجا برای تحلیل عدم قطعیت دما و بارش از

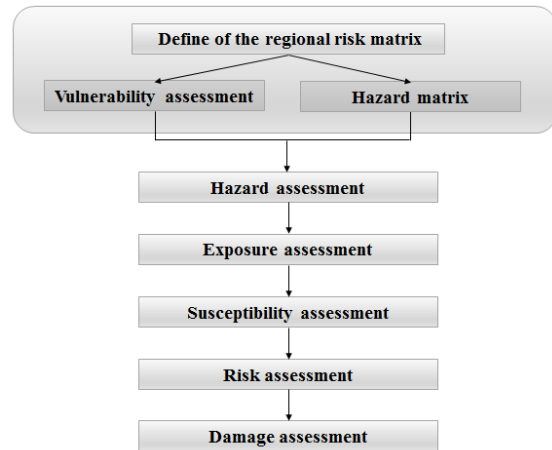


Fig. 3- The regional risk assessment framework
شکل ۳- مراحل چارچوب ارزیابی ریسک منطقه‌ای

بر اساس شکل ۳ گام دوم ارزیابی خطر است. ارزیابی خطر به منظور توصیف خطرات تغییر اقلیم انجام می‌شود که پتانسیل اثرات تغییر اقلیم بر گیرنده‌های خطر مشخص می‌شود. در واقع در این مرحله مشخص می‌شود که تغییر اقلیم در دوره‌های مورد بررسی آینده چه تأثیری روی گیرنده‌های خطر داشته و مقدار هریک از این گیرنده‌ها را نسبت به دوره مینا چه میزان و به چه شکلی تغییر داده است.

Table 2- Vulnerability matrix

جدول ۲- ماتریس آسیب‌پذیری

	Rivers	Groundwater resources	Agriculture areas
Quality effects	Nutrients Sediments	Groundwater quality	Sediments
Quantity effects	River flow	Aquifer recharge	Yield

Table 3- Hazard matrix

جدول ۳- ماتریس خطر

Effects	Hazard metric
Quality effects	Amount of Nitrogen, phosphorus and sediments
Quantity effects	Yield, Recharge, River flow

گام سوم ارزیابی تهدید است که با هدف شناسایی و طبقه‌بندی مناطق متأثر و گیرنده‌های مهم در حوضه انجام می‌گیرد. در این قسمت مشخص می‌شود هر کدام از عوامل تحت فشار چه میزان تحت فشار و تأثیر تغییر اقلیم هستند. در این مرحله معیارهای خطر تخمین زده شده ($h_{s,k}$) و مقادیر کنونی عوامل تأثیر (p) برای اثرات کمی و کیفی

تابع توزیع نرمال استفاده شده است که رابطه آن در زیر آورده شده است.

$$p(y|f_1, \dots, f_k) = \sum_{k=1}^k w_k g_k(y|f_k) \quad (4)$$

که در آن مدل‌های شبیه‌سازی موجود، $g_k(y|f_k)$ تابع توزیع هر یک از مدل‌ها و w_k احتمال انتخاب شبیه‌سازی k ام به عنوان بهترین شبیه‌سازی می‌باشد که بر اساس عملکرد شبیه‌سازی k ام تعیین می‌گردد.

ارزیابی ریسک پنجمین گام است که با هدف شناخت و گروه‌بندی مناطق و گیرنده‌های خطر به ریسک اثرات کمی و کیفی در حوضه انجام می‌شود. به این منظور مقادیر به دست آمده در هر دو گام چهارم و پنجم در یکدیگر ضرب شده‌اند. مقدار خروجی بین صفر تا یک متغیر است.

$$R_{k,s,i} = E_{k,s} \cdot S_{k,i} \quad (5)$$

که در آن $R_{k,s,i}$ مقدار نسبی ریسک برای خطر k سناریو s و گیرنده i ، $E_{k,s}$ مقدار نسبی در معرض خطر قرار گرفتن برای خطر k تحت سناریو s و $S_{k,i}$ مقدار نسبی آنالیز حساسیت برای خطر k و گیرنده i می‌باشد.

ارزیابی آسیب آخرین گام تحلیل ریسک منطقه‌ای است که ضررهای بالقوه مشخص شده برای مناطق و عوامل تحت تأثیر را مشخص می‌کند. به منظور محاسبه رتبه آسیب ابتدا با استفاده از رابطه (۶) مقدار نرمال شده مقادیر مؤلفه‌ها در سناریوهای مختلف محاسبه می‌شود.

$$V_j = \frac{\sum_{i=1}^n [v_{i,j}']}{n} \quad (6)$$

در این رابطه V_j نشان دهنده مقدار نسبی برای گیرنده i ام، $v_{i,j}'$ مقدار نرمال شده فاکتور j ام برای گیرنده i و n تعداد سناریوها می‌باشد. در نهایت تابع آسیب هر عامل بر اساس معادله زیر محاسبه می‌گردد و نقشه آسیب منطقه برای هر عامل محاسبه می‌گردد.

$$D_{k,s,i} = R_{k,s,i} \cdot V_i \quad (7)$$

که در آن $D_{k,s,i}$ مقدار خسارت ناشی از خطر k و گیرنده i در سناریو s ، $R_{k,s,i}$ مقدار خطر ناشی از خطر k و گیرنده i در سناریو s و V_i رتبه گیرنده i ام می‌باشد.

آینده نسبت به دوره مشاهداتی حاکی از آن است که نتایج مدل‌های GCM در سه دوره مورد بررسی متفاوت می‌باشند. اولین دوره پیش‌بینی مورد مطالعه شامل سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰ می‌باشد که در این دوره بیشترین تغییر دما در مدل MIROC5 سناریو RCP8.5 با مقدار ۱/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش در میانگین سالانه مشاهده شده است. در بازه زمانی سال‌های ۲۰۷۰-۲۰۴۱ به‌عنوان دومین دوره مورد مطالعه، در مدل MIROC5 در سناریو RCP8.5 دما با حدود ۲ درجه افزایش بیشترین تغییر را داشته است. نتایج حاصل از بررسی اثرات تغییر اقلیم در دوره پیش‌بینی آخر شامل سال‌های ۲۰۷۱ تا ۲۱۰۰ نشان می‌دهد مقدار میانگین سالانه دما نسبت به دوره مبنا با ۲/۵ درجه افزایش در مدل CNRM_CM5 تحت سناریو RCP8.5 بیشترین تغییر را داشته و به مقدار ۱۶/۲ سانتی‌گراد خواهد رسید. در هر سه دوره مورد بررسی بیشترین تغییر دما در فصل تابستان پیش‌بینی شده است که این موضوع نشان دهنده شدت گرما در فصل تابستان می‌باشد. به طور کلی نتایج حاصل از ۲۷ سناریو مورد مطالعه حاکی از آن است که تا انتهای قرن بیست و یکم مقدار دما در حوضه مورد مطالعه حدود ۱/۱ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره مبنا افزایش خواهد یافت. نمودار میانگین تغییرات ماهانه دما برای دوره‌های مختلف در شکل ۴ آورده شده است.

دومین متغیر هواشناسی مورد بررسی در این مطالعه متغیر بارش می‌باشد. بررسی‌های انجام شده بر روی خروجی‌های مدل‌های GCM در مورد بارش نشان می‌دهد که میانگین بارش در دوره پیش‌بینی در تمام مدل‌ها نسبت به دوره مبنا افزایش خواهد یافت. مقدار متوسط سالانه بارش در دوره مبنا حدود ۱۰۵۰ میلی‌متر می‌باشد که طبق خروجی‌های به دست آمده از مدل‌های مورد مطالعه، در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ بیشترین افزایش بارش در مدل MPI-ESM-LR_RCP8.5 با ۸۵/۴ میلی‌متر افزایش، در دوره ۲۰۷۰-۲۰۴۱ بیشترین افزایش در دو مدل IPSL_CM5A_LR و MPI_ESM_LR سناریو RCP8.5 با ۱۲۴/۵ میلی‌متر و بیشترین افزایش بارش تا انتهای قرن بیست و یکم با ۲۱۱/۵ میلی‌متر در مدل IPSL-CM5A-LR تحت سناریو RCP8.5 پیش‌بینی شده است. نمودار میانگین درصد تغییرات متغیر بارش در شکل ۵ آورده شده است.

۳-۲- توسعه، تحلیل حساسیت و واسنجی مدل SWAT

پیکره‌بندی مدل جهت استخراج شبکه آبراه‌های و زیر حوضه‌های آبریز دریاچه زریبار با استفاده از نقشه DEM منطقه انجام گرفت. با در نظر گرفتن نقاط ورودی آلودگی‌های غیر نقطه‌ای و خروجی‌های زیر حوضه‌ها در نهایت ۲۶ زیر حوضه برای دریاچه زریبار به‌دست آمد.

۳- نتایج

۳-۱- ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش در حوضه مطالعاتی

نتایج به‌دست آمده از مقایسه تغییرات بارش و دما در دوره‌های مختلف

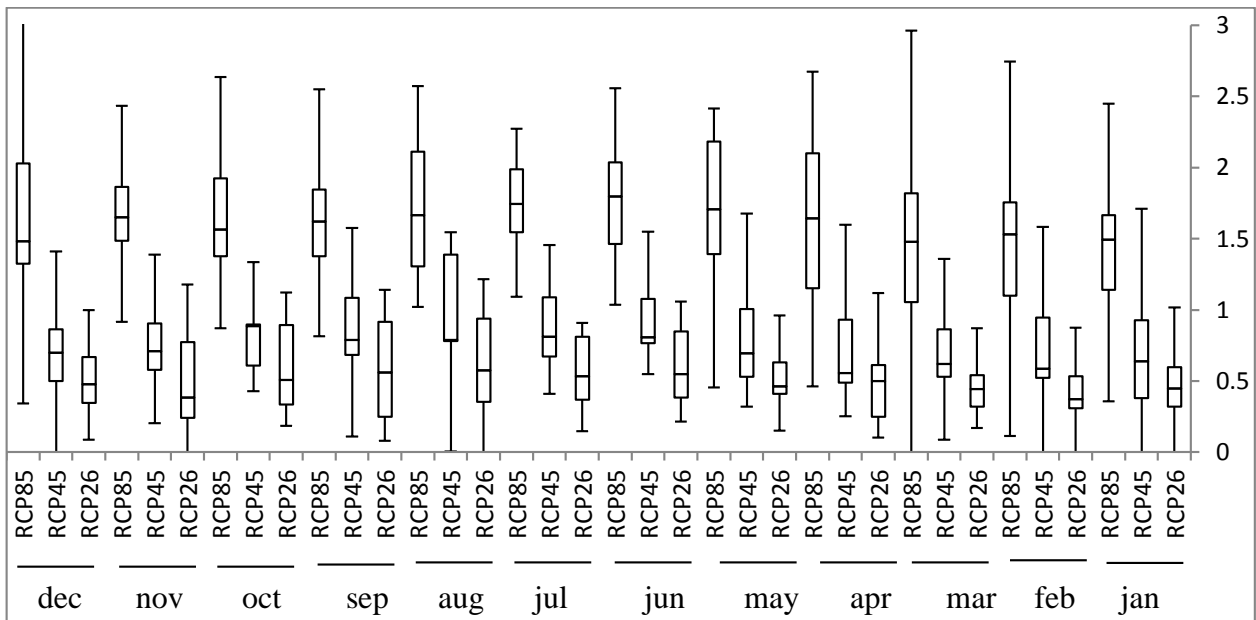


Fig. 4- Average temperature changes in studied periods for different months
 شکل ۴- نمودار میانگین تغییرات دما در دوره‌های مورد بررسی برای ماه‌های مختلف

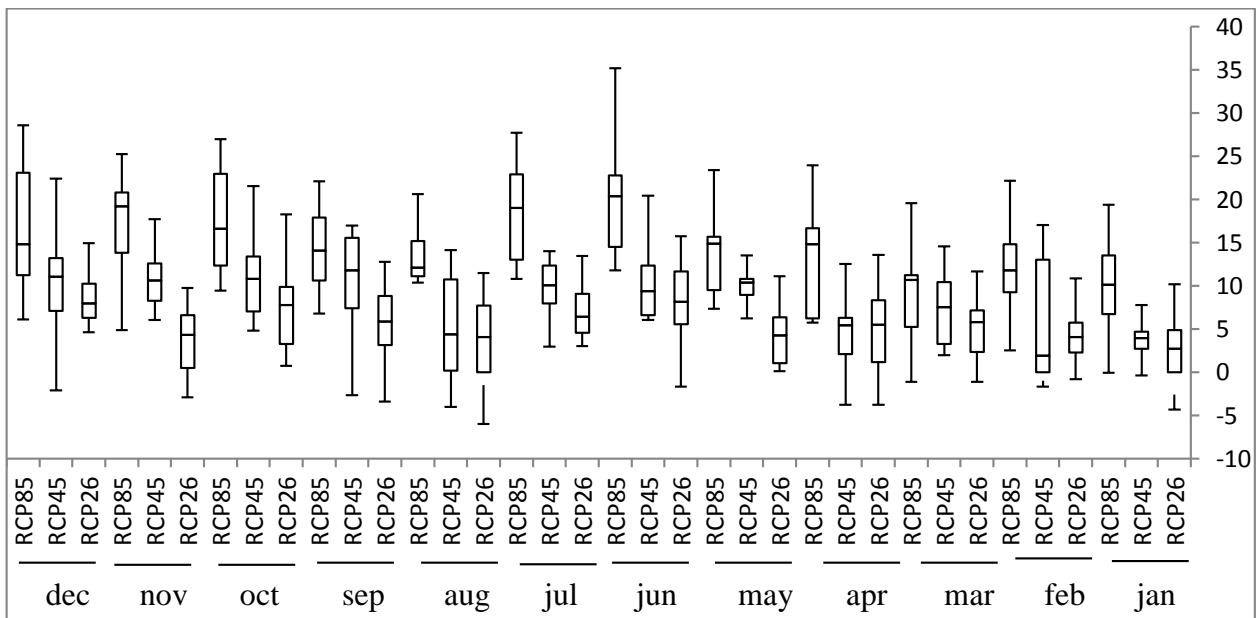


Fig. 5- Mean percent of precipitation changes in studied periods for different months
 شکل ۵- نمودار میانگین درصد تغییرات بارش در دوره‌های مورد بررسی برای ماه‌های مختلف

ورودی‌های کلیدی مربوط به مدیریت در مدل، شامل کاشت، شخم، برداشت، چرا، کود شیمیایی و کود حیوانی در مدل اعمال شده است (Imani et al., 2017).

تحلیل حساسیت پارامترهای مدل به منظور بررسی میزان تأثیرگذاری آن‌ها بر خروجی‌های مدل از اهمیت زیادی برخوردار است. تحلیل

اطلاعات روزانه مربوط به داده‌های اقلیمی از جمله بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشید از جمله اطلاعات مورد نیاز مدل می‌باشد که اعمال آن‌ها با توجه به شبیه‌سازی‌های مورد نیاز و روش‌های انتخاب شده برای آن‌ها حائز اهمیت است. در این تحقیق داده‌های روزانه بارش و دما مربوط به ۶ ایستگاه هواشناسی موجود در منطقه به مدل معرفی شد. همچنین

هر گروه در ماتریس آسیب‌پذیری در جدول ۲ آورده شده است و مطابق با گام‌های چارچوب ذکر شده میزان نسبی ریسک و آسیب برای هر یک از آن‌ها تخمین زده شده است

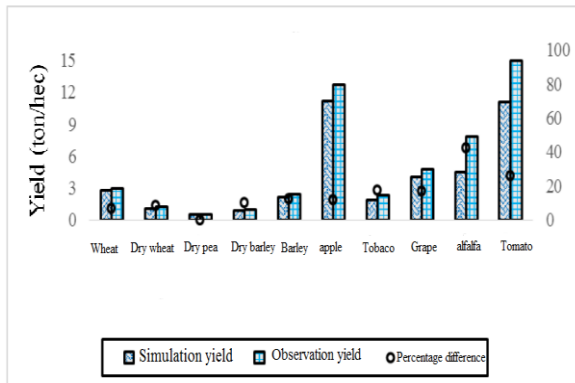


Fig. 7- Simulation and observation yield
شکل ۷- عملکرد محاسباتی و مشاهداتی

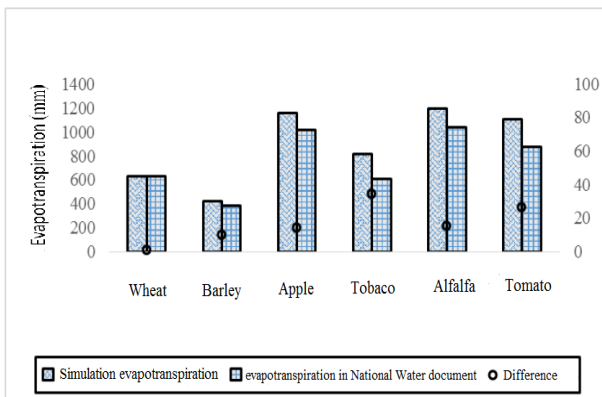


Fig. 8- Simulated evapotranspiration and maximum evapotranspiration in National Water Document
شکل ۸- تبخیر تعرق شبیه‌سازی و تبخیر تعرق حداکثر در سند ملی آب

در جدول ۵ مقدار شبیه‌سازی شده هر یک از فاکتورهای تحت خطر و درصد تغییرات آن‌ها در آینده آورده شده است. از میان سه دوره مورد بررسی در این مطالعه شدیدترین اثرات در سی ساله انتهایی قرن بیست و یکم مشاهده شده است. به منظور بررسی میزان آسیب‌پذیری، مقادیر شبیه‌سازی شده هر یک از فاکتورها در دوره‌های آینده با مقادیر متوسط آن‌ها در دوره مینا (به عنوان حد آستانه) مورد مقایسه قرار گرفته است. بدین ترتیب مقدار آسیب‌پذیری در شرایط تغییر اقلیم بیانگر میزان تغییرات آسیب‌پذیری مؤلفه‌ها نسبت در دوره‌های مورد بررسی آتی نسبت به دوره مینا می‌باشد. چنین رویکردی در مطالعه (UNEP, 2009) نیز مورد توجه قرار گرفته است.

حساسیت مدل با استفاده از نرم‌افزار SWAT_CUP انجام شد و پارامترهایی که تأثیر بیشتری روی خروجی‌ها داشتند مشخص شدند و پس از آن واسنجی و اعتبار سنجی مدل طی یک فرآیند چند مرحله‌ای انجام گرفت. در این مطالعه واسنجی مدل با استفاده از داده‌های مشاهداتی دبی، غلظت نیترات، غلظت فسفات، عملکرد و تبخیر تعرق انجام گرفت. نتایج واسنجی و اعتبار سنجی مدل در جدول ۴ ذکر شده است. دوره مورد استفاده جهت فرآیند کالیبراسیون سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ هستند. برای نمونه در شکل‌های ۶ تا ۸ نمودارهای کالیبراسیون دبی، عملکرد و تبخیر- تعرق نشان داده شده است. نتایج حاکی از عملکرد مطلوب مدل در شبیه‌سازی متغیرهای مورد بررسی می‌باشد.

Table 4- Results of model calibration and validation

جدول ۴- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل

Parameter	Calibration		Validation	
	R ²	RMSE	R ²	RMSE
Discharge (m ³ /sec)	0.65	0.64	0.80	0.52
Nitrate (ppm)	0.89	0.70	0.82	1.87
Phosphate(ppm)	0.56	0.87	0.52	0.96
The volume of (MCM)lake	0.79	0.24	0.33	0.34
Groundwater level (m)	0.86	0.96	0.79	1.17

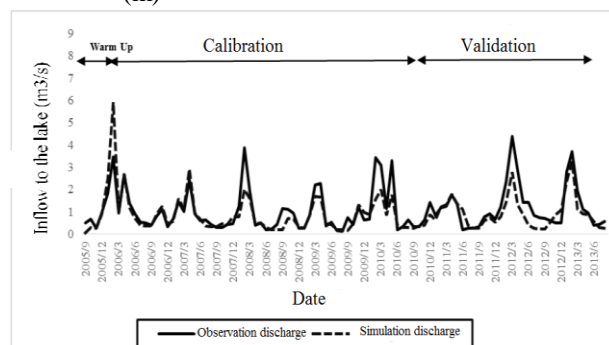


Fig. 6- Simulated and observed discharge in calibration and validation periods

شکل ۶- دبی شبیه‌سازی و مشاهداتی دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی (m³/s)

۳-۳- بررسی اثرات تغییر اقلیم بر گیرنده‌های خطر در حوضه مورد مطالعه در چارچوب ارزیابی ریسک منطقه‌ای

در این مطالعه به بررسی میزان خطر تغییر اقلیم بر پارامترهای مرتبط با کشاورزی و منابع آب پرداخته شده است. گیرنده‌های خطر در این مطالعه در سه گروه پارامترهای مرتبط با آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی و مناطق کشاورزی تقسیم شده‌اند. هر یک از پارامترها از دو منظر کمی و کیفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پارامترهای مرتبط با

Table 5- Vulnerable elements in base period and percent of changes in future

جدول ۵- مؤلفه‌های آسیب‌پذیر در دوره مبنا و درصد تغییرات آن‌ها در آینده

Studied parameter	2011-2040		2041-2070	2071-2100	
	Base	Average	Average	Average	
Yield	Wheat (ton/hect)	3	-3.36%	-8.35%	-12.4%
	Dry wheat (ton/hect)	1.2	-6.5%	-16.5%	-28.5%
	Barley (ton/hect)	2.4	-3.08%	-7.85%	-10.55%
	Dry barley (ton/hect)	1.0	-6.75%	-17.5%	-29.25%
	Tomato (ton/hect)	15.3	-5%	-11.5%	-16.5%
	Alfalfa (ton/hect)	7.8	-4.4%	-12.15%	-16%
	Tobacco (ton/hect)	2.3	-6.5%	-14.85%	-21.9%
	Apple (ton/hect)	12.0	-4.1%	-8.8%	-16.4%
Ground water	Recharge (mm/year)	128.7	-3.5%	-7.9%	-10.8%
	Nitrate (mg/lit)	52	-5.35%	-8%	-12.9%
	Phosphate (mg/lit)	0.15	-2.9%	-7.6%	-13.25%
Rivers and lake	Discharge (mm H ₂ O)	6880	+2.17%	+5.7%	+8.55%
	Nitrate (kg/year)	5680	+1.9%	+5%	+8.5%
	Phosphate (kg/year)	117	+1.9%	+5.3%	+8.2%
	Sediment (kg/year)	460.5	+1.81%	+5.1%	+7.8%

شدت بیشتری داشته است. نتایج مشابهی نیز در مطالعات Laux et al. (2010) و Yin et al. (2016) به دست آمده است. همچنین در میان محصولات آبی که به صورت آبی کشت می‌شوند گیاه تنباکو نسبت به سایر گیاهان آبی در نتیجه اثرات منفی تغییر اقلیم با کاهش عملکرد بیشتری روبه‌رو است. در شکل ۹-الف نقشه کاربری اراضی‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه و در شکل ۹-ب مناطق مختلف بر اساس میزان آسیب‌پذیری عملکرد محصولات در کاربری‌های مختلف بر مبنای دسته‌بندی صورت گرفته در جدول ۶ نشان داده شده است.

Table 6- Classification of yield exposure
جدول ۶- دسته‌بندی رتبه آسیب عملکرد محصولات

Exposure Classes	Range (%)
Very low	<5
Low	5-10
Medium	10-25
High	25-50
Very high	>50

مؤلفه‌های دبی و رسوب دو پارامتر دیگر متأثر از پدیده تغییر اقلیم هستند. نقشه آسیب این دو مؤلفه بر اساس دسته‌بندی جدول ۷ در شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب نشان داده شده است. از منظر مقدار جریان خروجی از کاربری‌های مختلف، بیشترین مقدار جریان آب

اطلاعات موجود در جدول ۵ نشان می‌دهد که علیرغم افزایش نسبی بارش و منابع آب سطحی حوضه، باز هم عملکرد محصولات در دوره‌های مورد مطالعه کاهش خواهند یافت. بررسی الگوی تغییرات بارش و دما در دوره رشد گیاهان حاکی از آن است که در مراحل حساس رشد گیاهی شدت افزایش دما نسبت به افزایش بارش بیشتر است. همین موضوع موجب افزایش تنش دمایی و آبی برای محصولات می‌گردد که به موجب آن عملکرد کاهش پیدا کرده است. بررسی تغییرات مؤلفه‌ها در چارچوب ارزیابی ریسک منطقه‌ای نشان می‌دهد که در میان محصولات کشاورزی مورد مطالعه بیشترین رتبه ریسک و آسیب مربوط به محصولات دیم می‌باشد که این موضوع نشان دهنده این است که این محصول نسبت به سایر محصولات بیشتر در معرض خطر تغییر اقلیم قرار دارد. دلیل این موضوع وابستگی محصولات دیم به بارش‌ها برای تأمین نیاز آبی است چرا که برخلاف محصولاتی که به صورت آبی کشت می‌شوند و در دوره‌های آبیاری منظم آبیاری می‌شوند این محصولات یا اصلاً آبیاری نمی‌شوند و یا تنها یک یا دو بار در طول دوره کشت آب مازاد بر بارش به آن‌ها داده می‌شود. مطالعه Rezaei et al. (2016) در خصوص بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات در حوضه دریاچه ارومیه، نیز حاکی از کاهش عملکرد در کلیه محصولات در نتیجه تغییر اقلیم به واسطه تغییرات الگوی دما و بارش در دوره‌های حساس رشد می‌باشد. این کاهش عملکرد در محصولات دیم نسبت به محصولات آبی

با تهدید زیادی ناشی از افزایش بارش‌ها مواجه نمی‌باشد. در مطالعات Ashofte et al. (2008) و Ghahar Zade et al. (2015) افزایش دبی رودخانه‌ها پس از تغییر اقلیم مشاهده شده است.

خروجی در کاربری کشت آبی شبیه‌سازی شده است که شرایط تغییر اقلیم نیز از آسیب‌پذیری این کاربری حکایت دارند چرا که به دلیل آبیاری در این بخش و افزایش بارندگی‌ها امکان افزایش جریان و آسیب‌های ناشی از آن از جمله فرسایش و آیشویی مواد نیز وجود دارد. با توجه به افزایش جریان خروجی از این کاربری انتظار می‌رود که مقدار رسوبات خروجی از این کاربری نیز افزایش یابد که قرار گرفتن این بخش در رتبه‌بندی آسیب‌پذیری خیلی زیاد رسوبات بیانگر این موضوع می‌باشد. کاربری کشت دیم و کاربری مرتع دومین کاربری آسیب‌پذیر از منظر جریان خروجی هستند. کاربری کشت دیم در دسته‌بندی رتبه آسیب رسوبات نیز در کلاس زیاد قرار گرفته است اما کاربری مرتع در این دسته‌بندی به همراه کاربری مرتع و جنگل بلوط در دسته خیلی زیاد قرار گرفته‌اند که دلیل آن پوشش گیاهی کم این بخش و اثر بارش‌ها در افزایش رسوبات می‌باشد. در کاربری جنگل‌های بلوط نیز به دلیل پوشش گیاهی موجود مقدار جریان خروجی و رسوبات

Table 7- Classification of sediment and discharge exposure

جدول ۷- دسته‌بندی رتبه آسیب رسوبات و دبی

Exposure Classes	Sediment range (%)	Discharge range (%)
Very low	<3	<5
Low	3-6	5-10
Medium	6-10	10-20
High	10-15	20-30
Very high	>15	>30

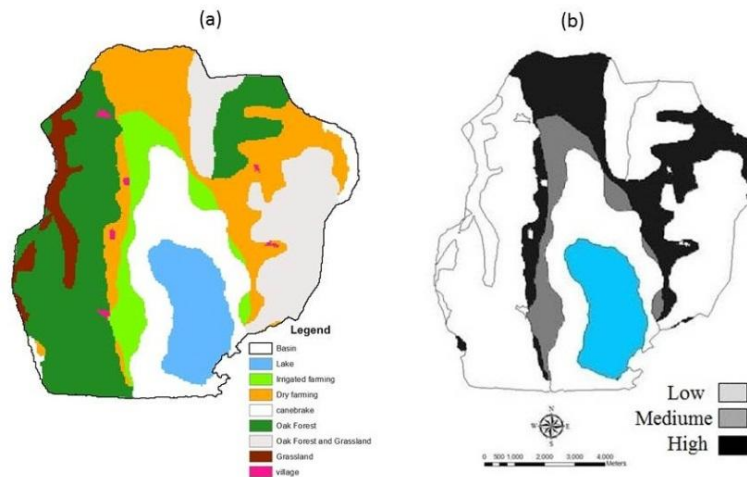


Fig. 9. a- Land use in the region, b- Classification of vulnerabilities based on yield during the periods
 شکل ۹- الف- کاربری اراضی‌های موجود در منطقه، ب- دسته‌بندی محدودده بر اساس میانگین رتبه آسیب عملکرد در دوره‌های

مورد بررسی

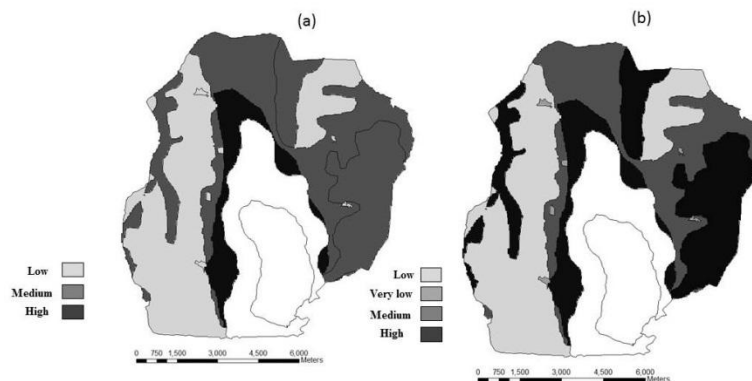


Fig. 10. a- Classification of vulnerabilities based on discharge during the studied periods, b- Classification of vulnerabilities based on sediment during the studied periods

شکل ۱۰- الف- آسیب‌پذیری کاربری‌های مختلف بر اساس میانگین رتبه آسیب آب خروجی در دوره‌های مورد بررسی، ب- آسیب‌پذیری کاربری‌های مختلف بر اساس میانگین رتبه آسیب رسوبات در دوره‌های مورد بررسی

از دیگر مؤلفه‌های آسیب‌پذیری در نتیجه تغییر اقلیم در حوضه می‌توان به مقدار تغذیه آبخوان و مقدار مواد مغذی نفوذ یافته به آبخوان اشاره نمود. پس از محاسبه رتبه آسیب مؤلفه‌های ذکر شده به تفکیک کاربری‌های مختلف موجود در حوضه و دسته‌بندی این مقادیر نقشه‌های ۱۳ تا ۱۵ به عنوان نقشه‌های ریسک منطقه‌ای برای این مؤلفه‌ها به دست آمد. مقادیر حاصل تغذیه آبخوان نشان می‌دهد که در نتیجه اثرات ناشی از تغییر اقلیم مقدار آب نفوذ یافته به سفره‌های آب زیرزمینی منطقه کاهش می‌یابد که این موضوع نشان‌دهنده آسیب‌پذیری این مؤلفه می‌باشد. مقدار کاهش این مؤلفه در سطح کاربری‌های مختلف موجود در حوضه به جز جنگل‌های بلوط با روند مشابهی شبیه‌سازی شده است. کم بودن رتبه آسیب تغذیه در جنگل‌های بلوط ناشی از پوشش درختی این منطقه و در نتیجه تأثیر کمتر افزایش دما پیش‌بینی شده تا انتهای قرن بیست و یکم می‌باشد.

همانطور که در بخش‌های قبل ذکر شد بررسی‌ها نشان می‌دهد که تا انتهای قرن بیست و یکم متغیرهای دما و بارش در منطقه مورد مطالعه افزایش خواهد یافت. همچنین بررسی تغییرات تبخیر تعرق در منطقه مورد مطالعه که نمودار میانگین تغییرات بلند مدت ماهانه آن در دوره‌های آینده و دوره پایه در شکل ۱۲ آورده شده است نشان می‌دهد که این متغیر نیز در آینده افزایش خواهد یافت.

با وجود افزایش بارش در این منطقه نتایج حاکی از افزایش نسبی جریان‌ات فصلی و کاهش آب نفوذ یافته به سفره‌های آب زیرزمینی می‌باشد. با توجه به عدم وجود رودخانه دائمی در منطقه، جریان‌ات سطحی معمولاً در فصول پربارش سال اتفاق می‌افتد و وابستگی بیشتری به مقادیر بارش در فصول ذکر شده دارد.

مؤلفه‌های نیتروژن و فسفر خروجی از حوضه از سایر عوامل تحت خطر در نتیجه تغییر اقلیم هستند. آسیب‌پذیری این دو مؤلفه به مقدار زیادی مشابه با آسیب‌پذیری جریان خروجی از حوضه می‌باشد. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که مقدار نترات و فسفات شسته شده از کاربری‌های کشت آبی و کشت دیم با افزایش جریان خروجی از این بخش‌ها افزایش یافته است که این موضوع بیانگر آسیب بیشتر برای دریاچه می‌باشد چرا که به دلیل افزایش بار مواد مغذی ورودی به دریاچه و افزایش دما پیش‌بینی شده در افق‌های آینده امکان وقوع پدیده تغذیه گرایبی و به دنبال آن شیوع مشکلات زیست‌محیطی در دریاچه و اطراف آن بیش از پیش افزایش می‌یابد. در کاربری مربوط به جنگل‌های بلوط نیز به دلیل عدم فعالیت‌های انسانی آسیب خیلی کمی برای این دو مؤلفه پیش‌بینی شده است. در سایر کاربری‌ها نیز با افزایش جریان مقدار مواد مغذی افزایش می‌یابد. در مناطق روستایی آسیب‌پذیری فسفر در دسته زیاد و آسیب‌پذیری نیتروژن در دسته کم قرار گرفته است که دلیل این موضوع وجود فسفر بیشتر در فاضلاب‌های انسانی می‌باشد. نتایج مشابهی در خصوص تغییرات فسفر و نیتروژن در اثر تغییر اقلیم در مطالعه Jeppesen et al. (2009) نیز مشاهده شده است. تفکیک مناطق مختلف آسیب‌پذیر بر اساس این دو مؤلفه در شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب نشان داده شده است.

Table 8- Classification of nutrients exposure

جدول ۸- دسته‌بندی رتبه آسیب بار مواد مغذی خروجی

Exposure Classes	Nitrogen range (%)	Phosphate range (%)
Very low	<5	<3
Low	5-10	3-6
Medium	10-20	6-10
High	20-35	10-15
Very high	>35	>15

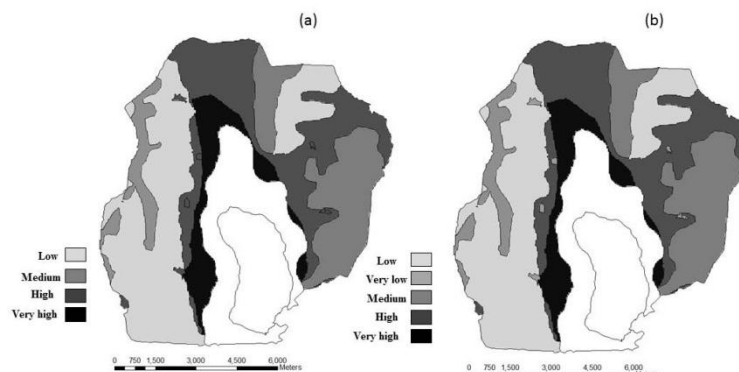


Fig. 11. a- Classification of vulnerabilities based on nitrogen during the studied periods, b- Classification of vulnerabilities based on phosphate during the studied periods

شکل ۱۱-الف - آسیب‌پذیری کاربری‌های مختلف بر اساس میانگین رتبه آسیب بار نیتروژن در دوره‌های مورد بررسی،
ب- آسیب‌پذیری کاربری‌های مختلف بر اساس میانگین رتبه آسیب بار فسفر در دوره‌های مورد بررسی

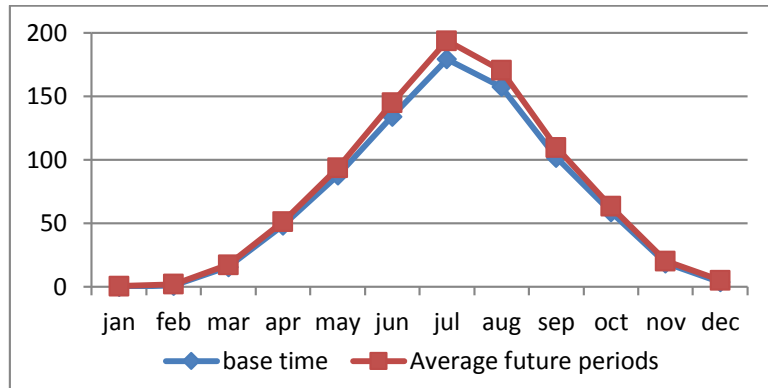


Fig. 12- Long term average of evapotranspiration in base time and future periods
 شکل ۱۲- نمودار میانگین بلند مدت تغییرات ماهانه تبخیر تعرق در دوره‌های مورد بررسی آینده و دوره پایه

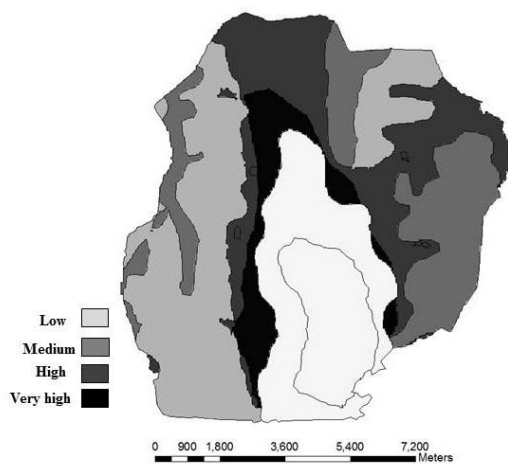


Fig. 13- Classification of vulnerabilities based on nitrogen in groundwater during the studied periods
 شکل ۱۳- آسیب پذیری کاربری‌های مختلف بر اساس میانگین رتبه آسیب بار نیتروژن آبخوان در دوره‌های مورد بررسی

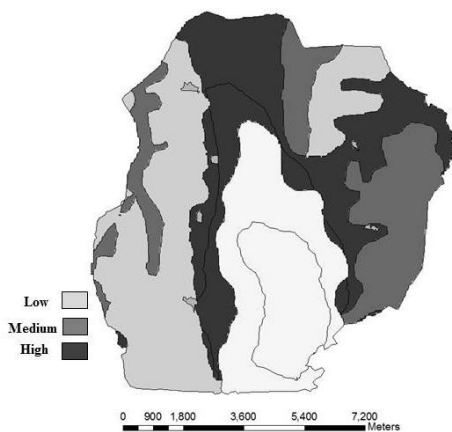


Fig. 14- Classification of vulnerabilities based on groundwater recharge during the studied periods
 شکل ۱۴- آسیب پذیری کاربری‌های مختلف بر اساس میانگین رتبه آسیب مقدار تغذیه در دوره‌های مورد بررسی

اما در مقابل تغذیه آب زیرزمینی که منبع اصلی تأمین آب دریاچه نیز می‌باشد تابعی از تغییرات اختلاف تبخیر و تعرق واقعی و بارش منطقه می‌باشد که با توجه به افزایش دما در منطقه و به تبع آن افزایش نسبی تفاوت تبخیر و تعرق و بارش کاهش تغذیه آب زیرزمینی منطقی به نظر می‌رسد.

مقدار بار نیتروژن و فسفر نفوذ یافته به آبخوان در این حوضه به ترتیب ۵۲ و ۰/۱۵ میلی‌گرم بر لیتر شبیه‌سازی شده است. با توجه به اینکه نتایج حاصل از بررسی تغییرات تغذیه آبخوان روند نزولی این مؤلفه تا انتهای دوره پیش‌بینی را نشان می‌دهد تغییرات پیش‌بینی شده برای مواد مغذی نفوذ یافته به داخل آبخوان نیز در صورتی که مقدار نیتروژن و فسفر مورد استفاده تغییری نکند روند کاهشی دارند. بررسی مقدار نفوذ مواد مغذی به سفره‌های آب زیرزمینی در کاربری‌های مختلف نشان می‌دهد که بیشترین مقدار نفوذ در کاربری‌های کشت آبی، کشت دیم و مناطق روستایی وجود دارد. که دلیل این موضوع استفاده از کودهای کشاورزی نیتراژ و فسفات در کاربری‌های تحت کشت و فاضلاب‌های تولید شده ناشی از فعالیت‌های انسانی در مناطق مسکونی می‌باشد. در جدول ۹ رتبه آسیب مؤلفه‌ها دسته‌بندی و در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ نقشه آسیب‌پذیری این مؤلفه‌ها نمایش داده شده است.

Table 9- Classification of recharge and groundwater nutrients exposure

جدول ۹- دسته‌بندی رتبه آسیب تغذیه و مواد مغذی آبخوان

Exposure Classes	Recharge range (%)	Nitrogen range (%)	Phosphate range (%)
Very low	< 7	< 3	< 2
Low	7-15	3-7	2-4
Medium	15-25	7-15	4-10
High	25-40	15-25	10-20
Very high	>40	>25	>20

رویکردهای واقع بینانه سازگاری با تغییر اقلیم بسیار مفید واقع گردد. نتایج استفاده از این رویکرد در حوضه دریاچه زربار حاکمی از آن است که تحت شرایط تغییر اقلیم، متغیرهای بارش و دما در حوضه مورد مطالعه تا انتهای قرن بیست و یک افزایش خواهند یافت. افزایش بارش منجر به افزایش جریانات سطحی فصلی و افزایش دما منجر به افزایش مصارف واقعی آب و وقوع تنش‌های دمایی در محصولات منطقه می‌شود. همچنین در نتیجه این تغییرات عملکرد گیاهانی از جمله گندم و جو دیم، تنباکو و گوجه‌فرنگی کاهش خواهد یافت. پارامترهای تغذیه آبخوان، بار نیتروژن کل و بار فسفر کل در حوضه مورد مطالعه از دیگر پارامترهای آسیب‌پذیر می‌باشند که باعث افت کیفیت آب سفره‌های زیرزمینی و دریاچه خواهد شد. در این شرایط تفکیک رتبه آسیب بر اساس چارچوب RRA در کاربری‌های مختلف نشان می‌دهد که کاربری کشت آبی و کشت دیم آسیب‌پذیرترین مناطق در حوضه هستند. از این رو توصیه می‌گردد که به‌منظور کاهش اثرات منفی ذکر شده راهکارهای مختلف سازگاری با تغییر اقلیم در حوضه مورد بررسی قرار گیرد چرا که نتایج به‌دست آمده همگی تأکیدی بر لزوم توسعه راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم به‌منظور کاهش این اثرات منفی در حوضه می‌باشند. نتایج حاصل از مطالعه حاکمی از اثرات متقابل و به هم تنیده متغیرهای هیدرولوژیکی، کیفیت آب و کشاورزی می‌باشد و لزوم بررسی یکپارچه آن‌ها را در مطالعات تغییر اقلیم آشکار می‌سازد. بررسی منفرد هر مؤلفه مانند آنچه در مطالعات (Wu et al., 2012; Zhou et al., 2011; Laux et al., 2010; Shrestha et al., 2016) بدان پرداخته شده است، هر چند اطلاعات مفیدی در خصوص نحوه تأثیرپذیری آن‌ها در شرایط تغییر اقلیم می‌دهد، اما تصمیم‌گیری در ارتباط با انتخاب بهترین راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم منوط به تحلیل جامع شرایط حوضه از منظر متغیرهای مؤثر از این پدیده می‌باشد. رویکرد مورد استفاده در این مطالعه به عنوان چارچوبی برای تحلیل یاد شده می‌تواند مفید واقع گردد.

۵- مراجع

- Ashofteh P (2008) Uncertainty analysis of climate change impact on the Bayesian approach (case study: Aidoghmosh basin east Azerbaijan). M.Sc. Thesis, Department of Irrigation and Drainage, Tehran University (In Persian)
- Baruffi F, Cisotto A, Cimolino A, Ferri M, Monego M, Norbiato D, Scarinci A (2012) Climate change impact assessment on Veneto and Friuli plain groundwater. Part I: an integrated modeling approach for hazard scenario construction. Science of the Total Environment 440:154-166

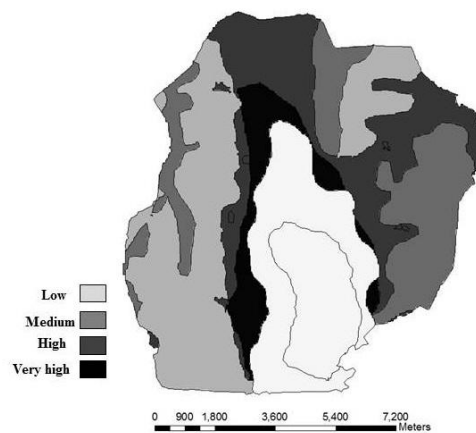


Fig. 15- Classification of vulnerabilities based on phosphate in groundwater during the studied periods

شکل ۱۵- آسیب‌پذیری کاربری‌های مختلف بر اساس میانگین رتبه آسیب بار فسفر آبخوان در دوره‌های مورد بررسی

به‌طور کلی از مقایسه مقادیر رتبه آسیب حاصل برای مؤلفه‌های مورد مطالعه می‌توان اینگونه استنباط نمود که اولین مؤلفه در معرض خطر در نتیجه تغییر اقلیم عملکرد محصولات کشاورزی کشت شده در منطقه هستند. مؤلفه‌های تغذیه آبخوان و بار مواد مغذی به ترتیب عوامل بعدی در معرض خطر هستند که جهت کم کردن آسیب هر یک از این عوامل بایستی اقداماتی جهت سازگاری با این پدیده در منطقه اتخاذ گردد.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

هدف اصلی در این مطالعه ارائه رویکردی برای ارزیابی جامع اثرات تغییر اقلیم در سطح حوضه‌های آبریز بر مبنای چارچوب ارزیابی ریسک منطقه‌ای (RRA) می‌باشد. بدین منظور با ترکیب برون‌دادهای مختلف مدل‌های گردش عمومی جو و مدل جامع و مفهومی SWAT تغییرات غیر قطعی مؤلفه‌های کلیدی در سطح حوضه آبریز دریاچه زربار با استفاده از رویکرد RRA مورد تحلیل قرار گرفت. رویکرد بکار گرفته شده در این مطالعه در مقایسه با سایر مطالعات انجام شده در این زمینه نظیر مطالعات (Pasini et al. (2012) و (Iyalomhe et al. (2015) که تنها به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی تمرکز دارند، متمرکز بر اثرات چند وجهی و چند جانبه این پدیده بر سیستم‌های به هم پیوسته آب سطحی و زیرزمینی و کشاورزی در شرایط عدم قطعیت است. بدین منظور تحلیل ریسک و آسیب‌پذیری مؤلفه‌های مورد بررسی بر اساس تلفیق نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوهای مختلف و محتمل اقلیمی با استفاده از روش میان‌گیری مدل بیزی انجام گرفت. این رویکرد می‌تواند در تحلیل یکپارچه حوضه‌های آبریز و ارائه

- assessment in Veneto and Friuli Plain groundwater. Part II: A spatially resolved regional risk assessment. *Science of the Total Environment* 440:219-235
- Piao S, Yin L, Wang X, Ciais P, Peng S, Shen Z, Seneviratne SI (2009) Summer soil moisture regulated by precipitation frequency in China. *Environmental Research Letters* 4(4):044012
- Rezaei zaman M, 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
- Schaake J C, Waggoner P E (1990) From climate to flow. *Climate Change and US Water Resources* 177-206
- Sharmila S, Joseph S, Sahai A K, Abhilash S, Chattopadhyay R (2015) Future projection of Indian summer monsoon variability under climate change scenario: An assessment from CMIP5 climate models. *Global and Planetary Change* 124:62-78
- Shrestha S, Bach TV, Pandey VP (2016) Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Environmental Science & Policy* 61:1-13
- Srinivasan M S, Gérard-Marchant P, TamieL V, Gburek W J, Steenhuis T S (2005) Watershed scale modeling of critical source areas of runoff generation and phosphorus transport. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 41(2):361-375
- Su B, Huang J, Gemmer M, Jian D, Tao H, Jiang T, Zhao C (2016) Statistical downscaling of CMIP5 multi-model ensemble for projected changes of climate in the Indus River Basin. *Atmospheric Research* 178:138-149
- UNEP (2009) Ecosystem management programme. A new approach to sustainability. 2009 United Nations Environment Programme
- Wu Y, Liu S, Gallant A L (2012) Predicting impacts of increased CO₂ and climate change on the water cycle and water quality in the semiarid James River Basin of the Midwestern USA. *Science of the Total Environment* 430:150-160
- Yin X, Olesen J E, Wang M, Öztürk I, Zhang H, & Chen F (2016) Impacts and adaptation of the cropping systems to climate change in the Northeast Farming Region of China. *European Journal of Agronomy* 78:60-72
- Zhou G, Wei X, Wu Y, Liu S, Huang Y, Yan J, Liu X (2011) Quantifying the hydrological responses to climate change in an intact forested small watershed in Southern China. *Global Change Biology* 17(12):3736-3746
- Borah D K, Bera M (2003) Water-scale hydrologic and non-point source pollution models: Review of applications. *American Society of Agricultural Engineers* 47(3):789-803
- Feng S, Hu Q, Huang W, Ho CH, Li R, Tang Z (2014) Projected climate regime shift under future global warming from multi-model, multi-scenario CMIP5 simulations. *Global and Planetary Change* 112:41-52
- Gedney N, Cox P M, Betts R A, Boucher O, Huntingford C, Stott P A (2006) Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature* 439(7078):835-838
- Imani S, Delavar M, Niksokhan M H (2017) Simulation and assessment of management practices for reduction of nutrients discharge to the Zrebar lake using SWAT model. *Iran-water resources research* 13(1):69-78 (In Persian)
- Iyalomhe F, Rizzi J, Pasini S, Torresan S, Critto A, Marcomini A (2015) Regional risk assessment for climate change impacts on coastal aquifers. *Science of the Total Environment* 537:100-114
- Jackson R B, Carpenter S R, Dahm C N, McKnight D M, Naiman R J, Postel S L, Running S W (2001) Water in a changing world. *Ecological Applications* 11(4):1027-1045
- Jeppesen E, Kronvang B, Meerhoff M, Søndergaard M, Hansen K M, Andersen H E, Olesen J E (2009) Climate change effects on runoff, catchment phosphorus loading and lake ecological state and potential adaptations. *Journal of Environmental Quality* 38(5):1930-1941
- Jha M, Arnold J G, Gassma P W, Giorgi F, Gu R R (2006) Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi river basin streamflows using SWAT. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 42(4):997-1015
- Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z, Bonan G, Chan E, Cox P, Yamada T (2004) Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science* 305(5687):1138-1140
- Labat D, Goddérís Y, Probst J L, Guyot J L (2004) Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources* 27(6):631-642
- Laux P, Jäckel G, Tingem R.M, Kunstmann H (2010) Impact of climate change on agricultural productivity under rainfed conditions in Cameroon—A method to improve attainable crop yields by planting date adaptations. *Agricultural and Forest Meteorology* 150(9):1258-1271
- Pasini S, Torresan S, Rizzi J, Zabeo, A, Critto A, Marcomini A (2012) Climate change impact