# Research Paper

# Designing Scenario for Changing the Cultivation Pattern for the Sustainability of Water Resources in West Azerbaijan Province using a Dynamic System

Sheida Yousefi[1], Seyed Mehdi Mirdamadi[*2], Seyed Jamal Farjollah Hosseini[3], Farhad Lashgarara[4]
1. Ph.D. student in Agricultural Development, Department of Economic, Agricultural Extension and Education, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Associate Professor, Department of Economic, Agricultural Extension and Education, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
3. Associate Professor, Department of Economic, Agricultural Extension and Education, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
4. Associate Professor, Department of Economic, Agricultural Extension and Education, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

**Received:** 2021/10/13
**Revised:** 2021/11/18
**Accepted:** 2022/02/22

**Use your device to scan and read the article online**

DOI:
10.30495/wej.2023.5827

**Keywords:**
Changing crop patterns, Dynamic system modeling, Production, Water resources sustainability

**Abstract**

**Introduction:** Mismanagement and uncontrolled abstraction of water resources, especially in the agricultural sector, with the allocation of more than 90% of water consumption, will exacerbate the water crisis and the continuation of this process will make it catastrophic in the future.The present study investigates the effect of changing cultivation patterns on the sustainability of water resources and agricultural production in West Azerbaijan province.

**Methods:** This research has modeled two effective water resources subsystems hydrology and economic by using statistical data from 1991 to 2017, and the main variables were simulated up to the horizon of 1430. After calibration by simple genetic algorithm and verification under extreme condition tests, the scenarios of the current cropping pattern, low-consumption cultivation pattern and economic cultivation indicators, groundwater sustainable index (SUI) and water Exploitation index (WEI+), the impact of scenarios was evaluated.

**Findings:** The results indicated that the continuation of the current cultivation pattern reduces the volume of groundwater by 93/34% and the available surface water by 20% to the horizon of 1430; While the low-consumption cultivation pattern with a reduction of 52.88% in agricultural water demand by eliminating crops with high water requirements (beets) and allocating the cultivation area to crops with low water requirements (barley and canola) and increasing fallow by 10%, in addition on 53.72% improvement of water productivity, it increases the potential of groundwater 13.69 times and the available surface water 2.45 times, and with a positive effect on the sustainability Index (SUI) and water Exploitation Index (WEI+) Groundwater stability and creates the least water stress in the horizon of 1430. Therefore, in order to sustain water resources, cropping pattern policies should focus on low-use cropping pattern.

Citation: Yousefi S, Mirdamadi SM, Farjollah Hosseini SJ, Lashgarara F. Designing Scenario for Changing the Cultivation Pattern for the Sustainability of Water Resources in West Azerbaijan Province using a Dynamic System. Water Resources Engineering Journal. 2231; 16(57): 75- 90.

*** Corresponding author:** Seyed Mehdi Mirdamadi
**Address:** Dep. of Economic, Agricultural Extension and Education, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
**Tell:** +989123443955
**Email:** mirdamadi.mehdi@gmail.com

# Extended Abstract

## Introduction

Mismanagement and uncontrolled abstraction of water resources, especially in the agricultural sector, with the allocation of more than 90% of water consumption, will exacerbate the water crisis and the continuation of this process will make it catastrophic in the future. Therefore, in order to preserve the country's water resources, the current agricultural withdrawals from water resources should be reduced by a maximum of 75 to 70% in the next 25 years. In this regard, policies to change the pattern of crop cultivation is a necessary issue, although the pattern of cultivation can be influenced by many factors, including changes in strategies, import and export laws of agricultural products, climate, market supply and demand for the product, supply Water, job opportunities, etc., but modifying the cultivation pattern and cultivating crops with less water requirements and the optimal cultivation pattern will cause the highest yield and the highest productivity by allocating the least water resources in crop cultivation and Sustainability of water resources. The present study investigates the effect of different scenarios of cultivation pattern on the sustainability of water resources and agricultural production in West Azerbaijan province as a model of provinces affected by water stress in northwestern Iran. What will be the potential cultivation pattern of water resources and production in the future, given the continuation of the current trend? What effect will changing the cultivation pattern by focusing on cultivating low-consumption water crops or economic cultivation pattern in order to make more profit have on the sustainability of water resources?

## Materials and Methods

This research has been done using the dynamic systems approach. Dynamic systems is an approach to understanding the nonlinear behavior of complex systems over time, using the internal feedback of state and current loops and their time latency. This approach provides a dynamic rather than static view of complex systems, like water resources, it helps to gain a deeper understanding of how complex systems behave and evolve over time, so that we can react to abstraction from aquifers and surface water resources by design the scenarios for the present and future. Therefore, water resources management modeling in the present study includes two subsystems of hydrology and agricultural production that data related to the variables of each subsystem in the period 1991 to 1397 were collected and studied, then in the period The time of 1370-1430 (1991-2051) has been simulated in a one-year time frame and after calibrating the model by simple genetic algorithm and testing the model under extreme conditions, scenarios of the current crop pattern, low-consumption crop pattern and economic crop pattern to the model The impact of the scenarios was evaluated using two evaluation indicators, groundwater sustainability (SUI) and water utilization (WEI +).

## Findings

The results showed that the continuation of the current cultivation pattern with the continuation of the current trend of rainfall and irrigation, in addition to reducing production, will reduce the volume of groundwater by 93.34% and surface water inventory by 2030 to 1430 horizon. Revenue is more concentrated, with continued cultivation of economic and strategic crops such as beets and increased cultivation of rapeseed and barley will reduce groundwater potential by 3.35% and surface water volume by 0.17% at the horizon of 1430 compared to the normal cultivation pattern, while the pattern Low-consumption cultivation by reducing crops with high water requirements such as (beets) and allocating the cultivation area to crops with low water requirements (barley and canola) and releasing 20% of uncultivated lands, reduces the water demand to 8859 cubic meters per hectare ( m3 / hec) which is important compared to the water requirement of the current cultivation pattern of 11238 (m3 / hec) and in addition to reducing 40.65% of the total water consumption of the province and reducing 52.88% of water demand in the agricultural

sector causes interest If agricultural water is improved by 53.72%, observing this cultivation pattern will increase the potential of groundwater up to 13.69 times and the available surface water up to 2.45 times and Finally, with a positive effect on the Sustainability Index (SUI) and water utilization branches (WEI +), it causes the stability of water resources and creates the least water stress in the horizon of 1430. Of course, the pattern of low-water irrigation cultivation does not increase total production due to the preference for less water consumption, but it adds some value to the value added of the agricultural sector during the simulation period up to the horizon of 1430.

## Discussion

To ensure the performance of the model and confirm it, the model was tested under limit conditions. The results show that with the continuation of the current trend of precipitation, the groundwater level up to the horizon of 1430 is still declining, but in the conditions of a minimum test of precipitation (0%) the situation will be worse and this shows that logically The model behaves correctly and indicates the approval of the model, that it means the model has the necessary efficiency to analyze the scenarios. The current cultivation pattern with the highest level of demand from water resources and uncontrolled abstraction causes the preparation of aquifers, so it is necessary to control the improper exploitation of water resources, and this is possible by changing the current cultivation pattern. It is possible, the pattern of low-consumption cultivation water consumption with cultivation of plants with less water requirements by reducing water consumption in agriculture in addition to improving water productivity, will lead to more sustainability of water resources so that in current research values above zero and close to A SUI Sustainability Index and values less than %20 of the WEI + Index (Water Stress Conditions) in the Low Consumption Crop Pattern Scenario confirm this.

## Conclusion

Due to mismanagement and uncontrolled abstraction of water resources in the study area, which has exacerbated the water crisis, and the continuation of the current cultivation process or economic cultivation pattern to earn more profit and production will cause more instability of water resources in the future, Low-water irrigation cultivation is the best possible option for agricultural water management and sustainability of water resources by eliminating crops with higher water requirements.

## Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.


## Funding

No funding.


## Authors' contributions

Design and conceptualization: Sheida Yousefi, Dr. Sayed Mehdi Mirdamadi.
Methodology and data analysis: Sheida Yousefi, Dr. Sayed Mehdi Mirdamadi, Dr. Sayed Jamal f Hosseini, Dr. Farhad Lashgarara.
Supervision and final writing: Sheida Yousefi.

## Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

# مقاله پژوهشی

# طراحی سناریوی تغییر الگوی کشت جهت پایداری منابع آب در استان آذربایجان‌غربی با استفاده از سیستم‌های پویا

شیدا یوسفی[۱]، دکتر سیدمهدی میردامادی*[۲]، دکتر سید جمال فرج‌اله‌حسینی[۳]، دکتر فرهاد لشگر آرا[۴]
۱. دانشجوی دکترای توسعه کشاورزی، گروه اقتصاد، ترویج و آموزش کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲. دانشیار، گروه اقتصاد، ترویج و آموزش کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۳. دانشیار، گروه اقتصاد، ترویج و آموزش کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۴. دانشیار، گروه اقتصاد، ترویج و آموزش کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

**تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۲۱**
**تاریخ داوری: ۱۴۰۰/۰۸/۲۷**
**تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۳۱**

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید

DOI: 10.30495/wej.2023.5827

**واژه‌های کلیدی:**
پایداری منابع آب، تغییرالگوی کشت، تولید، مدل‌سازی سیستم‌های پویا.

## چکیده

**مقدمه:** سوءمدیریت و برداشت بی‌رویه از منابع آب بویژه در بخش کشاورزی و اختصاص بیش از ۹۰٪ آب مصرفی در این بخش، بحران آب را تشدید کرده و ادامه این روند، در آینده فاجعه‌آور خواهد بود. تحقیق حاضر به بررسی تأثیر تغییر الگوهای کشت بر پایداری منابع آب و تولیدکشاورزی در استان آذربایجان‌غربی پرداخته است.

**روش:** این تحقیق با استفاده از رویکرد سیستم‌های پویا دو زیرسیستم تأثیرگذار هیدرولوژی و اقتصادی رامدل-سازی کرده است و با استفاده از داده‌های آماری سالهای۱۳۷۰ تا ۱۳۹۸ متغیرهای اصلی تحقیق تا افق ۱۴۳۰ شبیه‌سازی شدند. پس از کالیبراسیون مدل بوسیله الگوریتم ژنتیک ساده و آزمون مدل در شرایط حدی، سناریوهای الگوی کشت کنونی، الگوی کشت کم‌مصرف و الگوی کشت اقتصادی به مدل وارد شد و تأثیر سناریوها با استفاده از دو شاخص ارزشیابی، پایداری منابع آب زیرزمینی (SUI) و بهره‌برداری آب (WEI+)، ارزیابی گردید.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد ادامه الگوی کشت کنونی سبب کاهش ۹۳/۳۴ درصدی حجم آب‌های زیرزمینی و ۲۰ درصدی موجودی آب‌های سطحی تا افق ۱۴۳۰ خواهد شد. درحالیکه الگوی کشت کم‌مصرف با کاهش ۵۲/۸۸ درصدی تقاضای آب کشاورزی با حذف محصولاتی با نیاز آبی بالا مثل (چغندر) و اختصاص سطح کشت به محصولاتی با نیاز آبی کمتر (جو و کلزا) و افزایش ۱۰٪ آیش اراضی، علاوه بر بهبود ۵۳/۷۲ درصدی بهره‌وری آب، پتانسیل آب‌های زیرزمینی را تا ۱۳/۶۹ برابر و آب‌های سطحی موجود را تا ۲/۴۵ برابر افزایش خواهد داد. که در نهایت با تأثیر مثبت بر شاخص پایداری (SUI) و شاخص بهره‌برداری آب (WEI+) سبب پایداری آب‌های زیرزمینی شده و کمترین استرس آبی را در افق ۱۴۳۰ ایجاد می‌کند.

**نتیجه‌گیری:** لازم است سیاست‌های تغییر الگوی کشت، ضمن تداوم کشت محصولات استراتژیک در جهت کاهش بهره‌برداری و پایداری منابع آب بر الگوی کشت محصولات کم‌مصرف آب تمرکز داشته باشد.

* **نویسنده مسئول:** سید مهدی میردامادی
**نشانی:** گروه اقتصاد، ترویج و آموزش کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
**تلفن:** ۰۹۱۲۳۴۴۳۹۵۵
**پست الکترونیکی:** mirdamadi.mehdi@gmail.com

## مقدمه

آب، پایه و اساس توسعه پایدار است زیرا آب مفهوم مشترک همه چالشهای جهانی است: انرژی، غذا، سلامت، صلح و امنیت و ریشه‌کنی فقر. افزایش روزافزون جمعیت، رشد صنعت، گسترش شهرنشینی و تغییر سبک زندگی و از همه مهمتر ضرورت تامین امنیت غذایی پایدار در کنار کاهش آب وسوء مدیریت آن، کم آبی را به یک بحران جدی در ایران مبدل کرده است بویژه که بخش کشاورزی با برداشت بیش از ۹۰ درصد مصرف کنونی، بطورکلی به همین منابع محدود آب وابسته است (۱) . بدیهی است که آب‌های استحصال شده فعلی و قابل استحصال آتی، پاسخگوی روند توسعه کشاورزی و تأمین امنیت غذایی جمعیت روبه‌رشد کشور نخواهد بود، جهت حفظ منابع آب موجود بایستی برداشتهای کنونی کشاورزی در ۲۵سال آینده حداکثر ۷۵ تا۷۰ درصد کاهش یابد (۲). تمام این مسایل ضرورت مدیریت پایدارمنابع آب را در ایران در شکل جدید و با استراتژیهای موثر کوتاه مدت و بلندمدت نشان می‌دهد. اما در شرایط کنونی با توجه به سیاست‌های اعمالی دولت در زمینه افزایش جمعیت و افزایش تقاضای آب در آتی که سبب تهی‌شدن بیشتر آب‌های زیرزمینی و مصرف بی‌رویه آب‌های سطحی می‌شود همزمان با وقوع خشکسالی‌های پی در پی و تغییرات اقلیمی، شناخت روش‌های کارآمد برای حفاظت از منابع آب و برنامه-ریزی برای توسعه بخش کشاورزی را ضروری کرده است. لذا بررسی علمی این پدیده نیاز به رویکرد جامعی جهت حل مشکلات منابع آب به سبب پیچیدگی عملکرد چرخه‌های هیدرولوژیکی و عوامل اقتصادی- اجتماعی و زیست‌محیطی تأثیرگذار آن دارد. رویکرد سیستمی یا سیستم‌های پویا (SD)[1] روش شناخته‌شده‌ای است که چارچوب نظری و مفهومی را برای مدل‌سازی پویا از منابع آب فراهم می‌کند ((۳)، (۴)، (۵)، (۶)، (۷)) و ابزار مناسبی برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب است ((۸)، (۹)، (۱۰)). این رویکرد می‌تواند بعنوان یک ابزار حمایت از تصمیم‌ها (۱۱) با کشف تصمیمات و سیاست‌هایی در قالب سناریوهای قابل‌قبول موردنیاز و بازخورد اثرات بلندمدت آن‌ها، عواقب جانبی پیامدهای ناخواسته تصمیمات سیاست‌ها را کاهش دهد ((۱۰)، (۱۱)، (۱۲) ، (۱۳) ) و ضمن تأمین امنیت‌غذایی و رشد اقتصادی- اجتماعی به پایداری منابع آب حوضه‌های آبریز کمک کند. در این راستا سیاست‌های تغییر الگوی کشت محصولات یک مساله ضروری است اگرچه الگوی کشت می‌تواند تحت تأثیر بسیاری عوامل ازجمله تغییر استراتژی‌ها، قوانین واردات و صادرات محصولات کشاورزی، آب و هوا، بازار عرضه و تقاضا برای محصول، تأمین آب، فرصت‌های شغلی و غیره قرار گیرد، اما اصلاح الگوی کشت و کشت محصولاتی با نیاز آبی کمتر و الگوی کشت بهینه سبب می‌شود با تخصیص کمترین منابع آب در کشت محصول، بیشترین عملکرد و بالاترین بهره وری را بدست دهد و سبب پایداری منابع آب شود. الگوی کشت بهینه مربوط به ارزیابی تولید است که یکی از روش‌های ارزشیابی اولیه در سنجش مدیریت پایدار آب است و می‌توان آن را برای تعیین مجموعه‌ای از شاخص‌های پایداری در سراسر زنجیره‌ی عرضه‌ی یک سیستم آب استفاده کرد (۱۴).

در طی چند دهه‌ی گذشته مطالعات زیادی در بهینه‌سازی الگوی کشت در جهت مدیریت پایدار منابع آب، در طیف گسترده‌ای از تکنیک‌های بهینه‌سازی مانند برنامه‌ریزی پویا و برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی، و برنامه‌ریزی چندهدفه و یکپارچه صورت گرفته است، چنانچه در تحقیق مدل‌سازی اندرکنش منابع آب و ارزش‌افزوده دشت بیرجند با استفاده از رویکرد سیستمی، ارتباط بین فعالیت اقتصادی و منابع آب موجود شبیه-سازی شده است؛ بررسی نتایج سناریوهای طبیعی بارندگی، نرخ رشد جمعیت و سیاست‌های مختلف رشد اقتصادی (موجود – غیر آب‌بر) در شرایط افزایش میزان منابع آب زیرزمینی و شرایط بدون افزایش منابع آب نشان داده است که با ادامه روند موجود در منطقه، میزان ارزش افزوده و منابع آب زیرزمینی بدتر خواهد شد لذا به‌منظور حفظ وضعیت منابع آب زیرزمینی و زیادشدن ارزش‌افزوده منطقه موردمطالعه، باید سرمایه‌گذاری بیشتری روی فعالیت‌های اقتصادی غیرآب‌بر نظیر بخش معادن صورت گیرد (۱۵). در تحقیق دیگری نیز با استفاده از مدل‌سازی سیستم دینامیکی از امنیت و پیوند منابع‌آب- غذا و انرژی در حوضه آبریز گاوخونی در ایران نشان داده شده، اعمال ترکیبی از سیاستها مانند تغییر الگوی کشت و کنترل برداشت از آب‌های زیرزمینی سبب می‌شوند نه‌تنها امنیت آب‌های سطحی ۴٪ و آب‌های زیرزمینی ۵٪ افزایش یابد، بلکه مصرف آب برای تولید غذا ۱۸٪ و برای تولید انرژی ۲۶٪ کاهش یابد (۱۶). در یک مطالعه نیز مدل بهینه‌سازی الگوی کشت در جهت مقابله با افزایش قیمت و هزینه محصولات زراعی با کشت محصولاتی با سودآوری بالا و نیاز آبی کمتر، توسعه داده شده که درآمد خالص کشاورزی را در مصر به حداکثر می‌رساند (۱۷). نتایج مطالعه دیگری در ارزشیابی سیستمی از استراتژی‌های سازگاری تغییرات اقلیمی برای مدیریت منابع آب در مرکز ایران، نشان داده است که بهبود زیرساختارها و بویژه اعمال مدیریت شدید بر تقاضای آب و تغییر الگوی کشت با کشت جایگزین برای محصولات با تقاضای بالای آب و اولویت‌دهی به نظارت بر اکوسیستم با تکمیل افزایش عرضه آب می‌تواند بطورموقت تنش آب را در یک حوضه کاهش دهد (۱۸). در تحقیق دیگری با استفاده از مدل گردش عمومی جو HADCM3 و شبیه‌سازی تأثیر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق محصول در دشت همدان، نشان داده شده اگرچه انتشار گازهای گلخانه‌ای در ۳۰ سال بعدی در تمام سناریوهای اقلیمی بطور محسوسی تبخیر و تعرق را افزایش نمی‌دهد، ولی تشدید آن در بلندمدت و ماه‌های گرم سال پیش‌بینی می‌شود (۱۹). همچنین در یک مطالعه مدل بهینه‌سازی خطی جهت افزایش بازده خالص سالانه در مصر گسترش داده شده و با گنجاندن عملکرد و نیازهای آبی محصولات مختلف و تنوع مکانی آنها در مدل، محصولات استراتژیک جهت تضمین امنیت غذایی درنظر گرفته شده است (۲۰). درمطالعه «برنامه ریزی منابع آب برای حوضه یاباایسس[2] چین، محققان توسعه چندین سیاست مشارکتی مانند یارانه‌ای کردن هزینه‌های منابع آب و تشویق کشت محصولات کم‌مصرف آب، سرمایه‌گذاری در فناوری

[1] . Systems Dynamic

[2] . Yaoba Oasis

آبیاری و مدیریت نهادی از طریق رویکرد سیستم دینامیکی را جهت مقابله با رفتارهای فاجعه‌آور زیست‌محیطی مؤثر دانسته‌اند (۲۱). در مطالعه دیگری جهت بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی برای منطقه مارکاندیا- هند، با توجه به محدودیت موجود منابع آب و همچنین نیروی کار، کود و بذر، مدلی را توسعه داده‌اند تا حداکثر سود خالص، با ثابت نگه داشتن سایر عوامل تولید بدست آید (۲۲). همچنین در تحقیق دیگری برای بررسی مقادیر و دینامیک‌های فعال در شستشوی نیترات در تناوب کشت زراعی در حوضه‌ی آبریز همدان- بهار، روانآب‌ها، عملکرد محصول و نیترات رودخانه با استفاده از ابزار ارزیابی SWAT مدل‌سازی شده است نتایج نشان داده کالیبراسیون مدل با استفاده از عملکرد محصول قابلیت اطمینان را در مورد رطوبت خاک و تبخیر و تعرق افزایش می‌دهد و پتانسیل مدل را برای بکارگیری سناریوهای مختلف جهت کاهش آبشویی نیترات تقویت نموده بطوری‌که مدل بهترین شیوه‌های مدیریتی را ارائه می‌کند (۲۳). همچنین در پژوهش تحلیل سودبخشی و ریسک در هند، یک مدل پویای برنامه‌ریزی غیرخطی از طریق کم کردن سطح زیرکشت محصولات ریسک‌دار و کشت محصولات باصرفه اقتصادی‌تر، برای ۲۰ سال آینده طراحی شده است (۲۴). نتایج تحقیق دیگری نشان داده مدل‌سازی دارای توانایی مناسبی در تخمین و ارزیابی آب با تغییر در الگوی کشت و تغییر قیمت آب در الگوی برداشت از منابع آب در حوضه رود موروبیجی استرالیا است و رویکرد سیستم‌دینامیکی با اعمال سناریوهای مختلف قیمت‌گذاری و تغییر الگوی کشت محصولات، دارای مزایای قابل توجهی در مصرف بهینه آب است (۲۵). نتایج یک مطالعه در ایران، با استفاده از مدل پویایی سیستم‌ها و شبیه‌سازی بهره-برداری از مخزن سد یامچی (اردبیل) نشان می‌دهد اعمال سیاست الگوی کشت بهینه سبب کاهش ۴۳٪ مصرف آب بخش کشاورزی در بازه زمانی ۱۴۱۰-۱۳۸۸ گردیده و شاخص‌های پایداری و عملکرد سد را بهبود می‌دهد (۲۶). نتایج مطالعه دیگری در ایران با مدل‌سازی پویا جهت ارزیابی سیاست‌های مدیریت آب کشاورزی در مقیاس ملی نشان داده که سناریوی اعمال کم‌آبیاری سبب افزایش درآمد خالص کشاورزی و تولیدناخالص داخلی می‌شود و جهت دستیابی به پایداری کامل در منابع آب ، بایستی به سیاست‌های دیگری ازجمله، الگوی کشت بهینه به شرط عدم افزایش سطح زیرکشت، بها داده شود (۲۷). نتایج تحقیق دیگری با مدل‌سازی سناریوهای کاهش آسیب‌پذیری کشاورزان در برابر خشکسالی با استفاده از رویکرد سیستم‌های پویا در استان خراسان‌جنوبی نشان داد سناریوی تغییر الگوی کشت با تأکید بر محصولات مقاوم به خشکی، مدیریت عرضه آب جهت کنترل بهره-برداری از منابع آب و تغییر سیستم‌آبیاری از سیستم سطحی به تحت-فشار در بلندمدت، تأثیر مثبتی بر شاخص کاهش آسیب‌پذیری کشاورزان در برابر خشکسالی داشته است (۲۸). نتایج مطالعه دیگری با مدل‌سازی پویایی سیستم منابع آب دشت مشهد جهت تحلیل استراتژی‌های توسعه پایدار، نشان داده تغییر الگوی کشت به کشت پیشنهادی (کشت گندم با نیاز آبی ۳۰۰۰ مترمکعب در هر هکتار) به عنوان یک سیاست برتر می‌تواند گامی اثربخش در جهت بهبود وضعیت منابع آب باشد (۲۹).

با توجه به محدودیت منابع آب و اهمیت مدیریت پایدارمنابع آب در استان آذربایجان‌غربی و نظر باینکه بحث پایداری منابع آب با اصلاح الگوهای کشت جهت مصرف بهینه آب در کشاورزی با استفاده از رویکرد سیستم‌های پویا کمتر مورد توجه بوده است، در این راستا هدف اصلی این مطالعه توسعه یک مدل شبیه‌سازی سیستم‌دینامیکی (SD) به عنوان ابزار موثر برنامه‌ریزی و سیاستگذاری درون‌بخشی و بین-بخشی برای مدیریت منابع آب و رسیدن به توسعه پایدار کشاورزی در استان آذربایجان‌غربی به عنوان الگویی از استانهای درگیر تنش آبی در شمالغرب ایران است. در تحقیق حاضر سعی شده است شاخص‌های پایداری منابع آب با استفاده از سیستم‌های پویا بررسی شود و تأثیر الگوهای کشت بر پتانسیل منابع آب و تولید کشاورزی ارزیابی شود به این امید که نتایج بدست آمده بعنوان ابزار مهم برنامه‌ریزی و تصمیم-گیری، بتواند با کاهش تقاضای آب و بهره‌برداری از آب‌های سطحی و زیرزمینی به پایداری منابع آب کمک کند.

**شکل ۱- موقعیت جغرافیای منطقه مورد مطالعه (استان آذربایجان‌غربی)**

## مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** استان آذربایجان غربی با وسعت ۲۱۴۷۳ کیلومتر مربع (بدون احتساب دریاچه ارومیه) در منتهی الیه شمال غربی کشور واقع شده و از لحاظ مختصات جغرافیایی، بین ۴۴ دقیقه تا ۲درجه و ۴۱ درجه و ۳۴ دقیقه طول شرقی و ۲۳ دقیقه تا ۵درجه و ۲۳ درجه و ۴۳ دقیقه عرض شمالی قرار دارد این استان با داشتن ۱۷ شهرستان،

۴۰ بخش و ۴۲ شهر تقریبا ۲,۳ درصد از مساحت کل کشور را تشکیل می‌دهد جمعیت استان آذربایجان‌غربی طبق سرشماری سال ۱۳۹۵، ۳,۲۶۵,۲۱۹ نفر است که ۴,۱ درصد جمعیت کل کشور را در خود جای داده‌است و از این لحاظ هشتمین استان پرجمعیت کشور به‌شمار می‌آید (۳۰). به‌علت شرایط آب و هوائی و موقعیت خاص جغرافیائی اکثر مناطق این استان دارای اقلیم نیمه‌خشک و خشک سرد بوده و متوسط بارندگی سالیانه آن در یک پریود ۳۶ ساله بر اساس آمار ایستگاههای مبناء، رقم ۳۵۵ میلیمتر است (۳۱)، که طی سالهای اخیر کاهش ۴۰ درصدی داشته است. پتانسیل آب‌های سطحی ۶/۷ میلیاردمترمکعب و پتانسیل آب های زیرزمینی نیز ۱/۸۴ میلیاردمترمکعب، است که حدودا ۱/۷ میلیارد مترمکعب آن بهره برداری شده است، این بهره‌برداری با استفاده از حدود ۳۷۰۲۵ حلقه چاه عمیق و نیمه عمیق، ۵۴۳ رشته قنات و ۸۴۷ باب چشمه صورت گرفته است (۳۰). محصولات غالب کشاورزی استان در بخش زراعی: گندم آبی و دیم، جو آبی و دیم، چغندر و کلزا و باغی: سیب و میوه‌های هسته‌دار است، بیش از ۷۵ درصد اراضی استان به کشت آبی اختصاص یافته است بخش کشاورزی با برداشت ۲۳۴۴/۷۸ میلیون مترمکعب (mcm) آب‌های سطحی و ۱۶۰۴ میلیون مترمکعب (mcm) آب‌های زیرزمینی، بیش از ۹۲ درصد از کل منابع آب مصرفی استان را بخود اختصاص داده است (۳۲). وابستگی ۶۰ درصدی اراضی کشاورزی به کشت آبی و اشتغال ۵۰ درصد جمعیت استان به کشاورزی و صنایع وابسته‌ی آن ، وجود پتانسیل‌های ویژه تولیدی در منطقه موردمطالعه و توانایی در تأمین غذای سه برابر جمعیت کنونی، لزوم مدیریت و حفظ منابع آب را ضمن توسعه بخش کشاورزی بیشتر نشان می‌دهد.

برای مدل‌سازی این مطالعه، از سیستم‌های پویا به‌عنوان ابزار مناسبی استفاده شده است. فلوچارت زیرین مراحل انجام‌شده در این مطالعه را نشان می‌دهد، هر مرحله از تحقیق به شرح زیر توضیح داده شده است:

| |
|---|
| – گردآوری داده‌های آماری متغیرهای دو زیرسیستم منابع آب و تولیدکشاورزی و و تجزیه و تحلیل در نرم‌افزار Excel وSPSS |
| ـ رسم نمودارهای علی جهت ایجاد ارتباط بین متغیرهای تحقیق |
| – توسعه مدل SD از طریق نمودارهای حالت– جریان (SFDs) برای دو زیرسیستم هیدرولوژی منابع آب و تولیدکشاورزی در محیط vensim |
| ـ کالیبراسیون مدل SD جهت به‌حداقل رسیدن خطا |
| ـ تایید مدل از طریق آزمون آن در شرایط حدی |
| ـ طراحی سناریوها |
| ـ اجرای سناریوهای مدنظر در سیستم و اجرای مدل جدید SD |
| ـ تحلیل نتایج سناریوهای اعمالی روی آبخوان‌ها و آب‌های سطحی و تولید و درآمد کشاورزی |
| ـ برآورد متوسط سالانه شاخص پایداری آب‌های زیرزمینی (SUI) و فشار روی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی (WEI+) از طریق اعمال سناریوها |

شکل ۲– الگوریتم متدولوژی و مراحل انجام تحقیق

**پویایی سیستم:** سیستم‌های دینامیک رویکردی جهت درک رفتار غیرخطی سیستم‌های پیچیده در طول زمان، با استفاده از بازخورد داخلی حلقه‌های حالت و جریان و تأخیر زمانی آنها است این رویکرد با ارائه یک دید پویا و نه استاتیک از سیستم‌های پیچیده‌ای مانند منابع آب کمک می‌کند تا درک عمیق‌تری ایجاد شود روی اینکه چگونه سیستم-های پیچیده در طول زمان رفتار می‌کنند و تکامل می‌یابند ((۳۳)، (۳۴)، (۳۵)، (۱۲)). بطوری‌که بتوانیم عکس‌العمل برداشت از آبخوان و منابع آب سطحی را با طراحی سناریوهای موردنظر برای زمان کنونی و آتی ارزیابی کنیم. بنابراین مدل‌سازی مدیریت منابع آب در مطالعه کنونی شامل دو زیرسیستم هیدرولوژی و تولیدکشاورزی است که داده‌های مربوط به متغیرهای هر یک از زیرسیستم‌ها در بازه‌ی زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۷ جمع‌آوری و مورد مطالعه قرار گرفتند، سپس با استفاده از نرم‌افزار vensim professional برای دوره زمانی ۱۴۳۰–۱۳۷۰ (۱۹۹۱–۲۰۵۱) در گام زمانی یک‌ساله شبیه‌سازی صورت گرفته است.

**زیرسیستم هیدرولوژی:** این زیرسیستم دارای دو متغیر حالت اصلی منابع آب زیرزمینی و آب‌های سطحی است که تأمین کننده اصلی تقاضای بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب‌اند، در زیرسیستم منابع آب، حجم برداشت از جریانات آب‌های سطحی(چشمه‌ها و سدها) ۲۵۷۱ میلیون مترمکعب گزارش شده است، که از این مقدار بخش کشاورزی بیشترین مصرف را داشته بطوری‌که ۲۳۴۴/۷۸ میلیون - مترمکعب از این آب (یعنی ۹۱/۲۰ درصد)، توسط این بخش مصرف شده است. همچنین در ادامه گزارش فوق، حجم برداشت از آب‌های زیرزمینی(تخلیه از چاه و قنات) ۱۷۳۹/۳۵ میلیون مترمکعب گزارش شده است که بخش کشاورزی با برداشت حجم ۱۶۰۴ میلیون مترمکعب (۹۲/۲ درصد)، بیشترین حجم برداشت را به خود اختصاص داده است (۳۲)، بنابراین استفاده و مدیریت صحیح این منابع جهت حفظ وضعیتکنونی کشاورزی و زیست‌محیطی و تضمین شرایط مناسب برای آینده لازم است

در پژوهش کنونی جهت بررسی مدیریت پایدار منابع آب، حجم آب زیرزمینی آب‌های (متغیر حالت) به مدل تعریف شده است و تحت‌تأثیر جریانات ورودی و خروجی است که بعنوان (متغیرهای جریان) به آن وارد یا از آن خارج شده‌اند، ازجمله جریانات ورودی مانند: جریانات آب ورودی از خارج استان و جریانات آب ورودی ناشی از بارندگی است؛ جریانات خروجی نیز شامل برداشت و مصارف بخش‌های مختلف و جریان آب خروجی به خارج استان و تبخیر از آبخوان است. حجم

آب‌های زیرزمینی در هر سال و حجم تجمعی آنها با استفاده از معادلات (۱) و (۲) محاسبه می‌شود.

$$\Delta SG,t = QGI,t - QGO,t \quad (۱)$$

$$S_{G,t} = \Delta S_{G,t} + S_{G,t-1} \quad (۲)$$

طبق معادله (۱) تغییر در ذخیره آب زیرزمینی ($\Delta SG,t$) در سال t، تحت-تأثیر مقادیر جریان ورودی به آبخوان QGI,t در سال t برحسب میلیون مترمکعب (mcm) و مقادیرجریان خروجی از آبخوان QGO,t در سال t بر حسب میلیون مترمکعب (mcm) است.

معادله (۲) نیز حجم تجمعی آب زیرزمینی در آبخوان SG,t در سال t را نشان می‌دهد که شامل مجموع تغییرات در ذخیره آب زیرزمینی ($\Delta SG,t$) در سال t و حجم تجمعی آب زیرزمینی SG,t-1 تا سال t-1 بر حسب میلیون مترمکعب (mcm) است.

حجم آب‌های سطحی (متغیر حالت) نیز در مدل تعریف و ورودی‌ها و خروجی‌ها به آن (متغیرهای جریان) به مدل معرفی شده‌اند. جریانات سطحی تاثیرگذار بر آن، جریان آب سطحی ورودی به داخل، جریان آب انتقالی از خارج استان و روانآب‌های حاصل از بارندگی (mcm۱۵۹۵۹) است. جریانات خروجی نیز شامل تبخیر از بارندگی، تبخیر از سطح آب آزاد، آب سطحی خروجی به ارس– عراق و برداشت کل بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب از آب سطحی (mcm ۲۵۵۴/۷۲) است (۳۲). منبع اصلی آب‌های سطحی نیز ۱۲ سد اصلی موجود در منطقه مورد مطالعه است که گزارش بیلان (۳۱) برداشت بی‌رویه و حجم منفی آب‌های سطحی را در درازمدت نشان می‌دهد، بنابراین در پژوهش کنونی تغییرات ذخیره آب‌های سطحی باید حداقل صفر در نظر گرفته شود (معادله ۳) تا مقادیر ورودی و خروجی مساوی باشد.

$$QSWI,t = QSWO,t \quad (۳)$$

مقادیر QSWI,t و QSWO,t به ترتیب جریانات ورودی و خروجی به آب‌های سطحی است.

**زیرسیستم اقتصادی:** در این زیرسیستم هشت محصول که بیشترین سطح زیرکشت و نیازآبی را در بخش کشاورزی به خود اختصاص داده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند که شامل محصولات زراعی مانند: گندم آبی، گندم دیم، جو آبی، جو دیم، چغندر، کلزا و محصولات باغی مانند: سیب و میوه‌های هسته‌دار(گلابی، به، زردآلو، آلبالو، هلو و ...) است و سطح زیرکشت، تولید، عملکرد، هزینه، قیمت و درآمد مربوط به هریک و سپس کل سطح زیرکشت، کل تولید، درآمد و هزینه کل و ... متغیرهای موردبررسی در این زیرسیستم هستند. در این زیرسیستم عملکرد و تولید محصول در شرایط محدودیت منابع آب نشان داده شده است که تابعی از سطح زیرکشت، عملکرد در هکتار و کل آب قابل استفاده موجود از آب‌های سطحی و زیرزمینی است.

$$Yic = \left(\frac{Qic}{hec}\right) WRconstraint \quad (۴)$$

طبق معادله بالا عملکرد محصول کشت آبی Yic حاصل مقدار محصول آبی تولیدشده (Qic) در واحد سطح هکتار (hec) است که در شرایط محدودیت و فشار بر منابع آب WRconstraint بدست آمده است.

$$TPi,r = Yi.rc * CAi.r \quad (۵)$$

تولید کل (TPi,r) نیز طبق معادله (۵) از مجموع عملکرد هر یک از محصولات آبی و دیم در واحد سطح محصول بدست آمده است.

**کالیبراسیون مدل (Calibration):** کالیبراسیون مدل جهت ارزیابی مدل برای تطبیق و تعدیل پارامترهای کنترل‌کننده صورت گرفته است، تا داده‌های تولیدشده در مدل پاسخی همانند نمونه اصلی سیستم ارائه دهند و مدل تا حدممکن واقعیت را منعکس کند. برای این منظور از یک الگوریتم ژنتیک ساده به‌عنوان یک مدل بهینه‌سازی استفاده شد و تابع هدف این الگوریتم طبق معادله (۶) بگونه‌ای تعریف شد که منجر به حداقل اختلاف بین سطح آب‌های زیرزمینی شبیه-سازی‌شده و سطح مشاهده‌شده‌ی آن از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۸ شود.

$$minimize \frac{\sum_{i=1}^{28}(GL^t_{Ob} - GL^t_{SI})^2}{28} \quad \text{معادله (۶)}$$

به‌ترتیب $GL_{Ob}$ و $GL_{SI}$ سطح آب‌های زیرزمینی مشاهده‌شده و سطح آب‌های زیرزمینی شبیه‌سازی‌شده در سال t هستند.

**آزمون مدل (Verification):** آزمون مدل جهت بررسی صحت-سنجی مدل در شرایط حدی صورت گرفته است. توانایی مدل در کارا بودن تحت شرایط بی‌نهایت به افزایش اطمینان‌پذیری از نتایج برای تصمیم‌گیری و اتخاذ سیاست‌ها می‌افزاید.

## سناریوها

با توجه به محدودیت منابع آب و جهت کاهش فشار بر این منابع سیاستهای تغییر الگوی کشت، سناریوهای مناسبی جهت کاهش مصرف و برداشت از منابع آب هستند این سناریوها با کشت گیاهان با نیاز آب کمتر و تغییر الگوی کشت، الگوهای زراعی مناسبی جهت کاهش مصرف آب در کشاورزی هستند. بنابراین در مطالعه کنونی، سه سناریوی الگوی کشت کنونی، الگوی کشت کم‌مصرف آبی و الگوی کشت اقتصادی به مدل معرفی شده و اثرات آن‌ها بر متغیر آب‌های سطحی و زیرزمینی و تولید و درآمد تا سال ۱۴۳۰ شبیه‌سازی شده است. سناریوی الگوی کشت کنونی، ادامه روند کنونی کشت و سطح اختصاص‌یافته به هر یک از محصولات است و سالانه ۱۰ درصد اراضی استان نیز مانند روند کنونی آیش درنظر گرفته شده است، چنانچه جدول (۱) نشان داده، متوسط نیاز آبی دراین الگوی کشت، ۱۱۲۳۸ مترمکعب در هکتار (m3/hec) است که طبق معادله (۷) بدست آمده است.

$$\overline{WR} * \overline{CA} = \overline{CWR} \quad (۷)$$

جایی که CWR متوسط نیاز آبی الگوی کشت است، WR نیاز آبی هر یک از محصولات و CA سطح زیرکشت هر محصول است. در سناریوی دوم یعنی الگوی کشت کم‌مصرف آبی ، کشت چغندر با بیشترین نیاز آبی حذف شده است و سطح آبیاری باغات سیب نیز ۵۰٪ کاهش یافته

است، و درمقابل اختصاص سطح کشت بیشتر به گندم و جو و کلزا با نیاز آبی کمتر، سبب شده متوسط نیاز آبی در هکتار به ۸۸۵۹ مترمکعب در هکتار (m3/hec) کاهش یابد همچنین بمنظور مدیریت بر مصرف آب و کاهش مصرف آن، سطح آیش نیز بیشتر شده و ۲۰ درصد اراضی بدون کشت رها شده‌اند. در الگوی کشت اقتصادی، بدلیل اولویت به کسب سود و درآمد بیشتر، سطح کشت اختصاص‌یافته به محصولات استراتژیک و اقتصادی مانندگندم، جو و کلزا افزایش یافته، و کشت چغندر نیز همچنان ادامه داشته است البته جهت کمک به مصرف کمتر آب، ۳۰ درصد اراضی بدون کشت رها شده‌اند، در این الگوی کشت متوسط نیاز آبی به ۱۰۵۱۳ مترمکعب در هکتار (m3/hec) رسیده است.

**جدول ۱- درصد سطح زیرکشت و متوسط نیاز آبی محصولات غالب زراعی- باغی در سناریوی مختلف الگوی کشت - استان آذربایجان‌غربی**

| سناریوی | محصول | گندم آیش | جو | چغندرقند | کلزا | سیب | میوه‌های-هسته‌دار | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| الگوی کشت رایج (روند کنونی) | سطح زیر کشت (درصد) | ٪۴۱ | ۰/۰۷ | ۰/۱۴ | ۰/۰۱ | ۰/۲۸ | ۰/۰۹ | ٪۱۰ |
| | متوسط نیاز آبی محصولات (m3/hec) | | | | ۱۱۲۳۸ | | | |
| الگوی کشت کم‌مصرف آبی | سطح زیر کشت (درصد) | ۰/۴۷ | ۰/۱۲ | ۰ | ۰/۱۸ | ۰/۱۴ | ۰/۰۹ | ٪۲۰ |
| | متوسط نیاز آبی محصولات (m3/hec) | | | | ۸۸۵۹ | | | |
| الگوی کشت اقتصادی | سطح زیر کشت (درصد) | ۰/۲۷ | ۰/۱۲ | ۰/۰۷ | ۰/۱۷ | ۰/۲۸ | ۰/۰۹ | ٪۳۰ |
| | متوسط نیاز آبی محصولات (m3/hec) | | | | ۱۰۵۱۳ | | | |

## شاخص ارزشیابی

در این پژوهش جهت ارزیابی اثرات سناریوها روی پایداری منابع آب و بدنبال آن تولید کشاورزی از دو شاخص پایداری [3](SUI) و شاخص بهره‌برداری آب [4](WEI+) استفاده شده است.

## شاخص پایداری (SUI)

برای بررسی پایداری آبخوان استان و تأثیر هر یک از سناریوها و مقایسه اثرات آنها روی منابع آب از شاخص پایداری استفاده شده است که با استفاده از معادله (۸) محاسبه شده است.

$$SUI = \frac{Qgw - D\ agri - D\ Indu - D\ dr}{Qgw} \qquad (۸)$$

جایی که SUI شاخص پایداری آبخوان است، Qgw متوسط شارژ سالانه منابع آب زیرزمینی است (mcm)، و Dagri ، DIndu و Ddr بترتیب متوسط سالانه تقاضای کشاورزی، صنعت و شهری است (mcm). مقدار منفی شاخص SUI نشان‌دهنده استفاده و برداشت بی-رویه از منابع آب زیرزمینی است و مقدار مثبت آن نشان متعادل بودن استفاده و برداشت از آبخوان است.

## شاخص بهره‌برداری آب (WEI+)

شاخص اصلاح‌شده بهره‌برداری آب جهت کسب اطمینان از برآورد تقاضای بخش‌های مختلف و ارزیابی مقادیر آب موجود استفاده شده است. این شاخص فشار برداشت از منابع آب موجود را نشان می‌دهد. شاخص بهره‌برداری آب وابسته است به نسبتی از متوسط تقاضای سالانه آب بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعت و شهری به متوسط شارژ سالانه منابع آب و مقادیر آن از رابطه معادله (۹) بدست آمده است.

$$WEI+ = \frac{D\ agri + D\ Indu + D\ dr - R\ uw}{Qgw - R\ uw} \times 100 \qquad (۹)$$

جایی که WEI+ شاخص اصلاح‌شده بهره‌برداری آب است (%)، Ruw کل آب برگشتی از مصارف بخش‌های مختلف است (mcm). لازم بذکر است مقادیر نزدیک به صفر شاخص WEI+ فشار کمتری بر آبخوان را نشان می‌دهد.

## بحث و نتایج

### کالیبراسیون مدل

برای بررسی دقت مدل، تمام متغیرهای حالت مشاهده‌شده مدل مقایسه شدند، با مقادیری که با استفاده از vensim در طول مدت شبیه‌سازی محاسبه شده بود. مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک ساده کالیبره شد تا خطا بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده کاهش یابد. جدول (۲) شاخص‌های آماری را قبل و بعد از کالیبره‌کردن نشان می-دهد، مقادیر بالای $R^2$ همبستگی زیاد داده‌های شبیه‌سازی شده و داده-های مشاهده‌شده را نشان می‌دهد و کاهش میانگین مربعات خطا (MSE) از تابع هدف بعد از کالیبراسیون نشان‌دهنده مقادیر قابل قبول مدل است، برخی از مقادیر پارامترهای کالیبره‌شده مدل در جدول (۳) آمده است.

[3] . Sustainable Index

[4] . Water Exploitation Index

**جدول ۲– شاخص‌های آماری قبل و بعد از کالیبره‌کردن مدل**

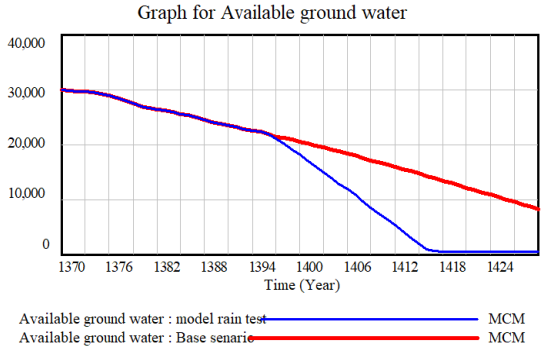
| Statistic index | After calibration | Before calibration |
|---|---|---|
| MSE | ۲/۰۷ | ۱۶۶۷/۲۱۲ |
| R2 | ۰/۹۷ | ۰/۶۷ |

**جدول ۳– مقادیر پارامترهای مدل کالیبره‌شده**

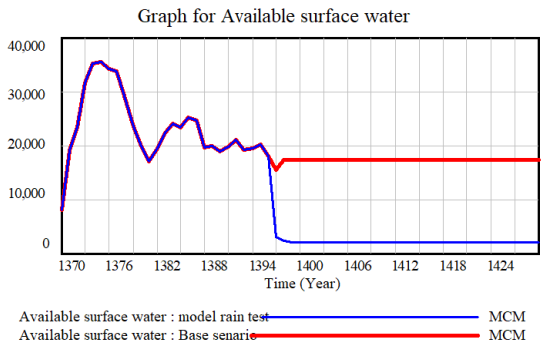
| ضریب نفوذپارندگی | ضریب مصرف آب کشاورزی | ضریب برگشت آب کشاورزی به آب‌های زیرزمینی | ضریب برگشت آب کشاورزی به آب‌های سطحی |
|---|---|---|---|
| ۰/۰۶ | ۰/۳ | ۰/۲ | ۰/۱ |

## تأیید مدل

تأیید مدل با آزمون مدل صورت گرفت. آزمون مدل در شرایط حدی، کنترل مقادیر خروجی از مدل در شرایط حدی می‌باشد انجام این آزمون کمک شایانی به ما در راستای شناخت نقاط ضعف مدل از حیث خروجی‌های غیرمنطقی می‌نماید. در این تحقیق، متغیر آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی در شرایط صفر یا min بارندگی (شرایط حدی) بررسی و در سناریوی model Rain اجرا شده، و با شرایط بارندگی معمول (روند کنونی) در سناریوی Base مقایسه شده تا میزان تغییر رفتار آن مشاهده شود. چنانچه نمودار (شکل۳ و۴) نشان داده موجودی آب زیرزمینی و سطحی با صفرشدن بارندگی، کاهش چشمگیری می‌یابد. اگرچه با ادامه روند کنونی بارش‌ها نیز همچنان سطح آب‌های زیرزمینی تا افق ۱۴۳۰ روند نزولی دارد، اما در شرایط تست حدی (نبود بارش) وضعیت وخیم‌تر هم خواهد شد و این نشان می‌دهد از نظر منطقی مدل درست رفتار می‌کند و بیانگر تأیید مدل و کارا بودن آن در آزمون شرایط حدی است.




**شکل۳ – نمودار آزمون تأیید مدل SD با فرض صفر بارندگی در model rain test و تغییرپتانسیل آب‌های زیرزمینی در افق ۱۴۳۰**




**شکل٤– نمودار روند تغییر رفتار و پتانسیل آب‌های سطحی استان در شرایط جریان ورودی بارش صفر و ادامه جریان کنونی بارش‌ها در افق ۱۴۳۰**

همچنین عدم وجود روانآب‌های سطحی بدلیل بارش صفر فشار بیشتری بر منابع آب زیرزمینی از طریق برداشت برای آب کشاورزی وارد کرده و تهی‌شدن آب‌های زیرزمینی با سرعت بیشتری صورت می‌گیرد.

## تحلیل سناریوها

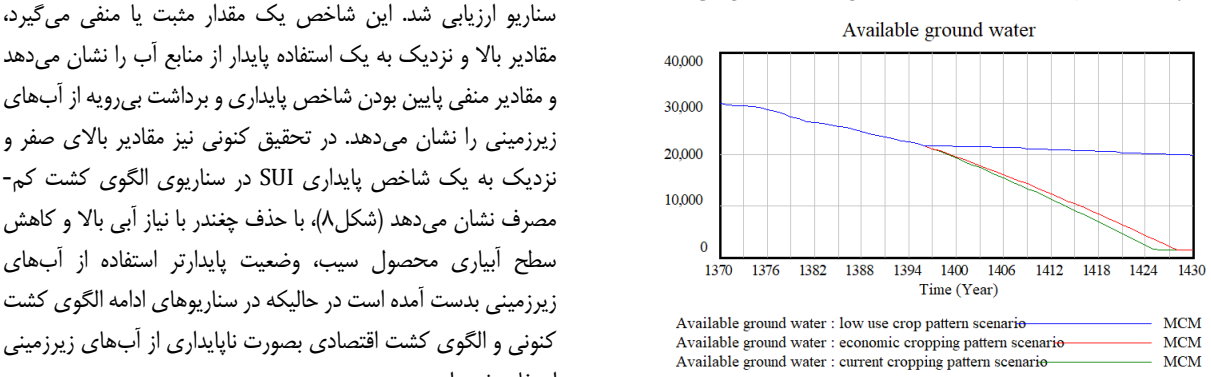
بعد از تأیید مدل، سه سناریوی الگوی کشت کنونی، الگوی کشت کم-مصرف و الگوی کشت اقتصادی طبق آنچه که در جدول (۱) آمده، جداگانه به مدل معرفی شدند. شکل‌های (۵)، (۶) و (۷)، نتایج این سناریوها را بر برداشت آب‌های زیرزمینی و سطحی، تولید نشان می-دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود الگوی کشت کنونی با بالاترین سطح تقاضای آب کشاورزی از آب‌های سطحی و زیرزمینی سبب افزایش ۴۴/۵۹ درصدی تقاضای آب در افق ۱۴۳۰ نسبت به شروع دوره شبیه-سازی خواهد شد و سبب می‌شود پتانسیل آب زیرزمینی از روند نزولی بسیار شدیدی برخوردار گردد بطوریکه سطح آبخوان تا افق ۱۴۳۰، ۹۳/۳۴ درصد کاهش می‌یابد و پتانسیل آب‌های سطحی نیز ۲۰٪ کاهش خواهد یافت بنابراین لازم است اعمال کنترلی بر بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب صورت گیرد و این با تغییر الگوی کشت کنونی امکان‌پذیر است، بویژه الگوی کشت کم‌مصرف آبی با کشت گیاهانی با نیاز آبی کمتر و عدم توسعه باغات در کاهش تقاضای آب بسیار موثر خواهد بود.

یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد الگوی کشت کم‌مصرف آبی در شرایط ادامه کنونی سایر شاخص‌ها مانند شرایط بارندگی و آبیاری، با حذف چغندر با مصرف آب بالا و کاهش ۵۰٪ سطح آبیاری باغات سیب سبب می‌شود سطح بیشتری به کشت محصولاتی با نیاز آبی کمتر مانند گندم و جو و کلزا اختصاص یابد همچنین با رعایت ۲۰ درصدی سالانه آیش اراضی، سبب پایین‌آوردن نیاز آبی به ۸۸۵۹ مترمکعب در هکتار (m3/hec) می‌شود که نسبت به نیاز آبی الگوی کشت کنونی ۱۱۲۳۸ (m3/hec)، قابل ملاحظه است بنابراین رعایت این الگوی کشت با کاهش ۴۰/۶۵ درصدی کل مصارف آب استان و پایین آوردن ۵۲/۸۸ درصدی تقاضای آب کشاورزی در افق ۱۴۳۰ نسبت به ادامه روند کنونی کشت سبب خواهد شد پتانسیل آب زیرزمینی ۱۳/۶۹ برابر و

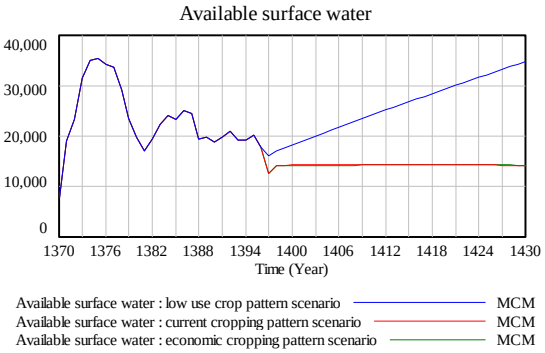
حجم آب‌های سطحی موجود نیز ۲/۴۵ برابر افزایش یابد همچنین الگوی کشت کم‌مصرف آبی البته بدلیل اولویت به مصرف آب کمتر، مقدار تولید کل را ۱۶/۶۱ درصد کاهش داده اگرچه درآمد کل (۶/۶۳ درصد)، سود (۲/۲۳ درصد) و ارزش‌افزوده بخش کشاورزی در افق ۱۴۳۰ نسبت به شروع دوره‌ی شبیه‌سازی مقداری افزایش می‌یابد. اما بیشترین تأثیر الگوی کشت کم‌مصرف بر بهره‌وری آب و افزایش ۵۳/۷۲ درصدی آن طی دوره شبیه‌سازی است یعنی در شرایط مقایسه، این الگوی کشت افزایش ۳۲/۵۴ درصدی بهره‌وری آب را نسبت به الگوی کشت عادی نشان می‌دهد.

الگوی کشت اقتصادی نیز که بر کسب سود و درآمد بیشتر تمرکز دارد، با ادامه کشت محصولات اقتصادی و استراتژیک مانند چغندر و افزایش کشت کلزا و جو سبب خواهد شد پتانسیل آب‌های زیرزمینی ۳/۳۵ درصد و حجم آب‌های سطحی ۰/۱۷ درصد در افق ۱۴۳۰ نسبت به الگوی کشت عادی کاهش یابد یعنی با اعمال این الگوی کشت، سطح آبخوان در افق ۱۴۳۰ در نزولی‌ترین وضعیت خود قرارخواهد گرفت. البته این الگوی کشت با نیاز آبی ۱۰۵۱۳ (m3/hec) در هکتار و کاهش آن نسبت به الگوی کشت عادی و افزایش سالانه سطح آیش به میزان ۳۰٪ ، سبب کاهش آبهای مصرفی استان و کاهش تقاضای آب کشاورزی در افق ۱۴۳۰ می‌شود و از جهت دیگر، بدلیل اولویت به تولید و کسب درآمد بیشتر، مقدار تولید ۱۹/۴۶ درصد، درآمد ۲۷/۷۶ درصد، سود کشاورزی ۱۹/۷۱ درصد و ارزش‌افزوده بخش کشاورزی ۲۹/۸۰ درصد در افق ۱۴۳۰ نسبت به شروع دوره شبیه‌سازی افزایش خواهد یافت.

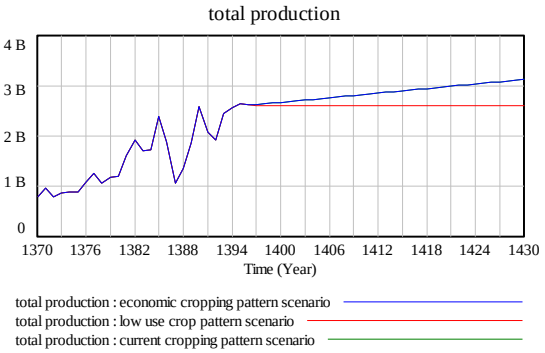
می‌توان گفت الگوی کشت کم‌مصرف آبی بهترین الگو جهت کاهش مصرف و تقاضای آب است و سبب می‌شود پتانسیل آبخوان و حجم آب‌های سطحی در افق ۱۴۳۰ در بالاترین سطح قرار گیرد، الگوی کشت اقتصادی نیز در شرایط محدودیت منابع آب، علی‌رغم کاهش نیاز آبی در هکتار، با تمرکز بیشتر بر محصولات استراتژیک جهت کسب درآمد و تولید بالاتر، گزینه بهتر است. بطوری که سودکل را نسبت به الگوی کشت کم‌مصرف ۲۶/۸۷ درصد در افق ۱۴۳۰ افزایش می‌دهد.




**شکل ۵- نمودار تأثیر سناریوهای الگوی کشت بر پتانسیل آب‌های زیرزمینی استان‌آذربایجان‌غربی (میلیون مترمکعب)**




**شکل ٦- نمودار تأثیر سناریوهای الگوی کشت بر موجودی آب‌های سطحی استان‌آذربایجان‌غربی (میلیون مترمکعب)**



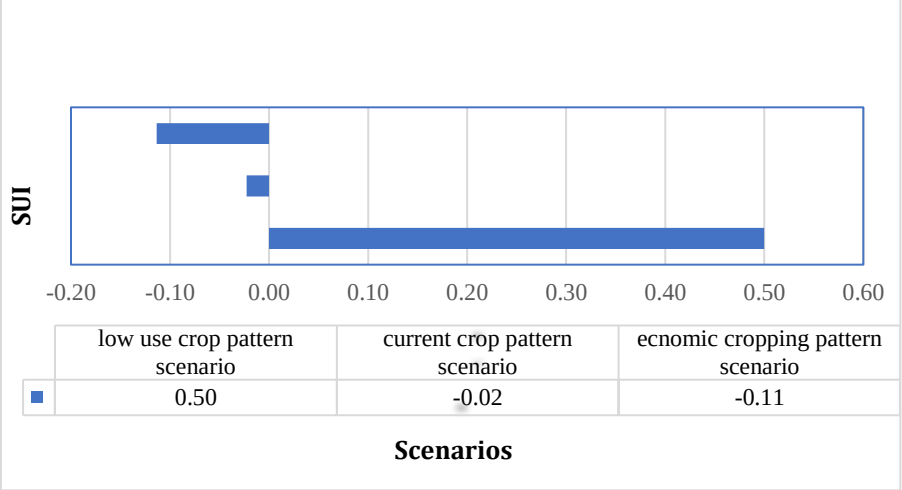

**شکل ۷- نمودار تاثیر سناریوهای الگوی کشت (الگوی کشت کم مصرف آبی- الگوی کشت کنونی- الگوی کشت اقتصادی) بر تولید کل کشاورزی**

## تحلیل شاخص‌ها

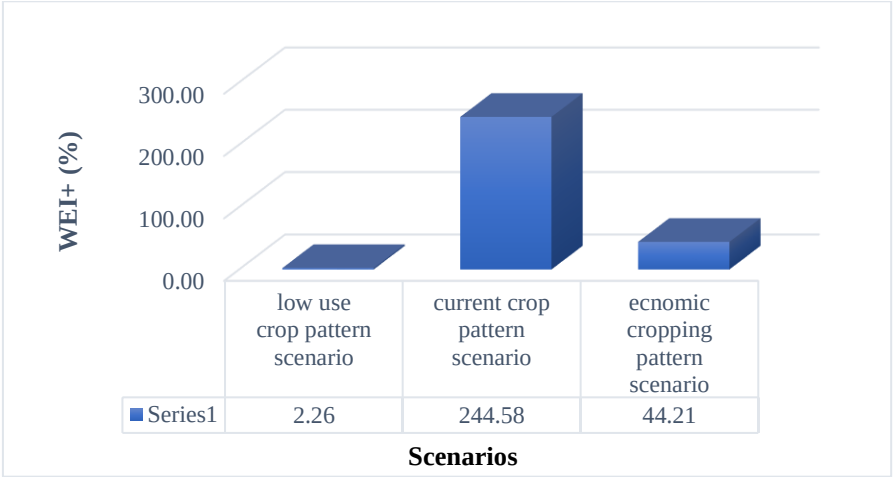
پایداری آب‌های زیرزمینی با استفاده از شاخص SUI برای هر سه سناریو ارزیابی شد. این شاخص یک مقدار مثبت یا منفی می‌گیرد، مقادیر بالا و نزدیک به یک استفاده پایدار از منابع آب را نشان می‌دهد و مقادیر منفی پایین بودن شاخص پایداری و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد. در تحقیق کنونی نیز مقادیر بالای صفر و نزدیک به یک شاخص پایداری SUI در سناریوی الگوی کشت کم-مصرف نشان می‌دهد (شکل۸)، با حذف چغندر با نیاز آبی بالا و کاهش سطح آبیاری محصول سیب، وضعیت پایدارتر استفاده از آب‌های زیرزمینی بدست آمده است در حالیکه در سناریوهای ادامه الگوی کشت کنونی و الگوی کشت اقتصادی بصورت ناپایداری از آب‌های زیرزمینی استفاده شده است.

همانطور که قبلاً ذکر شده، فشار بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی با WEI+ نشان داده می‌شود، مقادیر ۲۰٪ -۰ مربوط به عدم استرس آبی؛ مقادیر بین ۴۰٪-۲۱ وضعیت تنش آبی را نشان می‌دهد و مقادیر بالاتر از ۴۰٪ نیز به معنی فشار بی‌نهایت روی منابع آب زیرزمینی است.

نتایج شاخص WEI+ برای سناریوهای تحقیق در شکل (۹) نشان می‌دهد تنها سناریوی الگوی کشت کم‌مصرف با مقدار WEI+ کمتر از ۲۰٪ ، عدم استرس آبی را بوجود خواهد آورد و در سناریوهای الگوی کشت اقتصادی و ادامه روند کنونی کشت آبخوان تحت شرایط فشار شدید استرس آبی قرار خواهد گرفت بویژه ادامه الگوی کشت کنونی که فشار بی‌نهایت را نشان می‌دهد و این بدلیل بیشتر بودن تقاضای کشاورزی و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی بوجود می‌آید.




**شکل ۸ – متوسط سالانه شاخص پایداری آب‌های زیرزمینی (SUI) از طریق سناریوهای الگوی کشت**




**شکل ۹– متوسط سالانه شاخص بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی(WEI+) از طریق سناریوهای الگوی کشت**

## نتیجه‌گیری

تغییرات اقلیمی و محدودیت ذاتی منابع آب در ایران، توأم با سوءمدیریت و برداشت بی‌رویه از این منابع بحران آب را به فاجعه‌ای تبدیل کرده است، که علاوه بر تهی شدن آب‌های زیرزمینی، سبب بی‌ثباتی تولید و درآمد در بخش کشاورزی و گسترش فقر شده است. در این تحقیق تأثیر تغییرالگوهای کشت محصولات روی تولید و درآمد کشاورزی و پتانسیل آب‌های زیرزمینی و سطحی در استان آذربایجان‌غربی به‌عنوان منطقه مورد مطالعه، با استفاده از سیستم دینامیک مورد بررسی قرار گرفته است نتایج نشان می‌دهد الگوی کشت کم‌مصرف آبی با عدم کشت گیاهانی با نیاز آبی بالا مانند چغندر و رهاسازی ۲۰٪ سطح زیرکشت اراضی، سبب پایین آوردن ۵۲/۸۸ درصدی تقاضای آب کشاورزی می‌شود و با کاهش مصرف آب در هکتار سبب ۱۳/۶۹ برابری پتانسیل آب زیرزمینی و حتی ۲/۴۵ برابری آب‌های سطحی تا افق ۱۴۳۰ می‌شود و درآمد کل و سود نیز افزایش می‌یابد. مقادیر نزدیک به یک شاخص پایداری SUI نیز نشان‌دهنده ایجاد وضعیت پایدارتر آب‌های زیرزمینی از طریق سناریوی الگوی کشت کم‌مصرف است، مقادیر مناسب شاخص بهره‌برداری آب WEI+ نیز عدم استرس آبی را از طریق این سناریو در افق ۱۴۳۰ نشان می‌دهد این نتیجه تحقیق با نتایج تحقیق ترنر و همکاران در چین (۲۱) و مولوی در مقیاس ملی در کشور (۲۷) مطابقت دارد که الگوی کشت کم‌مصرف و بهینه، بشرط عدم گسترش سطح زیرکشت می‌تواند سبب پایداری منابع آب شود، اما مغایر با نتایج تحقیق کوتیر و همکاران در حوضه آبریز ولتا– غنا است (۱۱) که افزایش ۳۰ درصدی سطح زیرکشت سالانه و تقاضای ۲۰ درصدی آب جهت دستیابی به امنیت غذایی لازم بوده است. الگوی کشت اقتصادی نیز، اگرچه از نظر تولید، سود و درآمد و ارزش‌افزوده کشاورزی الگوی بهتر است اما با افزایش تقاضای آب و بالا بودن

شاخص +WEI و بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی سبب فشار بر منابع آب و ایجاد شرایط استرس آبی در منطقه موردمطالعه می‌گردد و با دارا بودن پایین‌ترین شاخص پایداری SUI در بین سناریوها، بیشترین ناپایداری را در منابع آب بوجود می‌آورد.

## سپاسگزاری

داده‌های مورداستفاده این مقاله با پشتیبانی و حمایت مدیریت منابع آب ایران و شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان‌غربی، سازمان جهادکشاورزی و سازمان هواشناسی اندازه‌گیری و جمع‌آوری شده است؛ بدین‌وسیله، از مسئولین و کارشناسان محترم این موسسات سپاسگزاری می‌شود.

## ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

## حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

## مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی: شیدا یوسفی، سید مهدی میردامادی؛
روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها: شیدا یوسفی، سید مهدی میردامادی، سید جمال فرج‌اله حسینی، فرهاد لشگرآرا ؛
نظارت و نگارش نهایی: شیدا یوسفی.

## تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

## References

1 Bijani M, Hayati D. 2013. Application of Environmental Attitudes toward Analyzing Water Conflict : The Case of Doroodzan Dam irrigation network. Iranian Agricultural Extension and Education Sciences, (January), 9(1): 81-91.

2 Samian, M., Naderi Mahdei, K., Saadi, H. and Movahedi, R. 2015. Identifying_Factors_affecting_Optimal_ Management_of_Agricultural_Water. J. Saudi Society of Agricultural Sciences, 14: 11-18.

3 Koop, S.H.A., van Leeuwen, C.J. 2017. The challenges of water, waste and climate change in cities. *Environ Dev Sustain*, **19**: 385–418.

4 Ahmad S, Simonovic SP. 2004. Spatial System Dynamics: New Approach for Simulation of Water Resources Systems. J Comput Civ Eng, 18(4):331–40. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2004)18:4(331)

5 Feng LH, Zhang XC, Luo GY. 2008. Application of system dynamics in analyzing the carrying capacity of water resources in Yiwu City, China. Math Comput Simul, 79(3):269–78.

6 Willuweit L, O'Sullivan JJ. 2013. A decision support tool for sustainable planning of urban water systems: Presenting the Dynamic Urban Water Simulation Model. Water Res. Dec 15;47(20):7206–20.

7 Hoekema DJ, Sridhar V. 2013. A System Dynamics Model for Conjunctive Management of Water Resources in the Snake River Basin. JAWRA J Am Water Resour Assoc [Internet]. Dec 1 [cited 2023 Jun 29], 49(6):1327–50.

8 Madani K, Mariño MA. 2009. System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-rud river basin. Water Resour Manag, 23(11):2163–87.

9 Mirchi A, Madani K, Watkins D, Ahmad S. Synthesis of System Dynamics Tools for Holistic Conceptualization of Water Resources Problems. Water Resour Manag. 2012;26(9):2421–42.

10 Simonović SP. 2012. Managing water resources: Methods and tools for a systems approach. Vol. 9781849771, Managing Water Resources: Methods and Tools for a Systems Approach. 2012. 1–640 p.

11 Kotir JH, Smith C, Brown G, Marshall N, Johnstone R. 2016. A system dynamics simulation model for sustainable water

resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana. Sci Total Environ [Internet]. 573:444–57.

12 Kelly RA, Jakeman AJ, Barreteau O, Borsuk ME, ElSawah S, Hamilton SH, et al. 2013. Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. Environ Model Softw. 47:159–81.

13 Sivapalan, M. 2015. Debates-perspectives on socio-hydrology: changing water systems and the tyranny of small problems—socio-hydrology. AGU PUBLICATIONS, Water Resources Research, 51: 4795–4805.

14 Ewing B, Reed A, Galli A, Kitzes J, Wackernagel M. 2010. calculation methodology for the national Footprint accounts , Edit I on Authors : Glob Footpr Netw Rep. 2010;

15 Mohammadi, H., Akbarpour, A., Bagheri, A. 2019. Modeling the interaction of water resources and value added in the Birjand Plain. Journal of Modeling in Engineering, 16(55): 279-298. https://doi.org/10.22075/jme.2018.11035.1066

16 Ravar Z, Zahraie B, Sharifinejad A, Gozini H, Jafari S. 2020. System dynamics modeling for assessment of water–food–energy resources security and nexus in Gavkhuni basin in Iran. Ecol Indic [Internet]. 108(March 2019):105682.

17 Adly N, Nosier S, Kassem N, Mahrous M, Salah R. 2018. Modelling the optimal cropping pattern to 2030 under different climate change scenarios: A study on Egypt. African J Agric Resour Econ. 13(3):224–39.

18 Gohari A, Mirchi A, Madani K. 2017. System Dynamics Evaluation of Climate Change Adaptation Strategies for Water Resources Management in Central Iran. Water Resour Manag, 31(5):1413–34.

19 Talebmorad H, Abedi Koupai J, Eslamian S, Mousavi S F, Singh VP, Ostad Ali Askari K, Akhavan S. 2021. Evaluation of the impact of climate change on reference crop evapotranspiration in Hamedan-Bahar plain. Int J Hydrol Sci Technol,11(3):333-347.

20 Osama S, Elkholy M, Kansoh RM. 2017. Optimization of the cropping pattern in Egypt. Alexandria Eng J [Internet], 56(4):557–66.

21 Turner BL, Iii HMM, Gates R, Tedeschi LO, Atzori AS. 2016. System Dynamics Modeling for Agricultural and Natural Resource Management Issues : Review of Some Past Cases and Forecasting Future Roles. Resources, 5(40): 1-24.

22 Shreedhar R, Hiremath CG, Shetty GG. 2015. Optimization of Cropping pattern using Linear Programming Model for Markandeya Command Area. International Journal of Scientific & Engineering Research, 6(9): 1311-1326.

23 Akhavan S, Abedi-Koupai J, Mousavi SF, Afyuni M, Eslamian SS, Abbaspour KC. 2010. Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar Watershed, Iran. Agric Ecosyst Environ [Internet]. 139(4):675–88.

24 Sharma RK, Sankhayan PL, Singh R. 2010. Analysis of Profitability and Risk in New Agriculture Using Dynamic Non-Linear Programming Model. J Agric Sci. 2(1):59–71. doi:10.5539/jas.v2n1p59

25 Elmahdi A, Malano H, Etchells T. 2007. Using system dynamics to model water-reallocation. Environmentalist. 27(1):3–12.

26 Fotookian MR, Safari N, Zarghami M. 2017. Dynamic modeling of Yamchi reservoir dam system by applying the optimal cultivation model to formulate exploitation policy. Iranian Water Resources Research, 13 (3): 1-16.

27 Molave H. Dynamic modeling for evaluating agricultural water management policies at the national

scale. PhD Thesis in Irrigation and Drainage Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran. Pp: 1-15.

28 Teimoori M, Mirdamadi SM, Hosseini SJF, Catchment H. 2019. Modeling of Climate Change Effects on Groundwater Resources: The Application of Dynamic Systems Approach. Int J Agric Manag Dev, 9(2):107–18. https://dorl.net/dor/20.1001.1.21595852.2019.9.2.3.3.

29 Hosseini SA, Bagheri A. 2013. Modeling the dynamics of Mashhad plain water resources system to analyze sustainable development strategies. Water and Wastewater, (4): 28-39.

30 Deputy of Development and Planning. "Economic, 2017. Social and Cultural Report of West Azerbaijan Province in 2016". West Azerbaijan Management and Planning Organization. Country Program and Budget Organization. 2017, Pp: 8-20.

31 Ministry of Energy. Report on the establishment of a geographical information system in the province and the study areas of the performance of the West Azerbaijan Regional Water Company. 2018. Office of Basic Studies of Water Resources, Integration and Balance Group of the Regional Water Company of West Azerbaijan Province. 2018, Pp: 1-58.

32 Ministry of Energy. 2018. Long-term water balance report of the Office of Basic Studies of Water Resources. Integration and balance group of West Azerbaijan Regional Water Company. 2018, Pp: 1-54.

33 Fottester JW. Industrial dynamics. MIT Press, Cambridge, MA, 1961.

34 Forrester JW. Industrial Dynamics: A Major Breakthrough for Decision Makers. Roots Logist. 2012;(August):141–72.

35 Sterman, J.D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Boston: McGraw-Hill, 2000.