



Evaluation of Resources Sustainability Indexes in Water-Food-Energy Nexus through Developing and Analysing the Management Scenarios with Respect to Virtual Water Content; Case Study: Lenjanat Sub-Basin

S.A.H. Aghili¹, M.H. Golmohammadi^{2*} and A. Nikouei³

Abstract

Water resources management needs true understanding of food and energy management with focus on Agricultural Sector. Water-Energy-Food Nexus Framework on the basis of sustainability of supply and exploitation of resources is trying to integrally manage and operate different sources of energy, water and food with respect to scenario analysis. In addition to sustainability concepts, environmental costs such as GHG emissions in general and CO₂ emission in particular which come from the exploitation of fossil fuels and how they affect the ecosystem CO₂ emission is another important factor that should be addressed. In this research, eight scenarios are developed based on the 6 defined indicators and the use of solar PV farms. The scenarios have been implemented after simulating water and food in the WEAP software and rainfall-runoff model and model calibration for Lenjanat Sub-basin as the case study. The scenarios were; 1) Base scenario (business as usual) 2) Crop pattern scenarios 3) Increasing irrigation efficiency 4) implementation of solar PV farms, as well as three combinations of these scenarios and increasing the pump efficiency in scenario four. Due to conjunctive use of surface and groundwater resources, scenario six (combination of scenarios 3 and 4) were topranked among all other scenarios. In Addition, base scenario ranked last and indicated that the current trend worsens the condition in the study area.

Keywords: Water-Food-Energy Nexus, Sustainability Index, MCDM, Scenario Development.

Received: September 21, 2020

Accepted: January 1, 2021

ارزیابی شاخص‌های پایداری منابع در هم‌بست آب-غذا-انرژی به کمک تدوین و تحلیل سناریوهای مدیریتی با توجه به مفهوم آب مجازی؛ مطالعه موردی: زیرحوضه لنجانات

سید امیرحسین عقیلی^۱، محمدحسین گل‌محمدی^{۲*} و علیرضا نیکویی^۳

چکیده

مدیریت منابع آب، نیازمند درک درستی از مدیریت همزمان منابع غذا و نیز مدیریت منابع انرژی به‌خصوص در بخش کشاورزی است. چارچوب هم‌بست آب-غذا-انرژی با رویکرد پایداری منابع و مصارف، به تحلیل مدیریت و بهره‌برداری ترکیبی از منابع آب، غذا و انرژی به کمک سناریونگاری می‌پردازد. همچنین علاوه بر مفاهیم پایداری، هزینه‌های زیست‌محیطی همچون انتشار کربن دی‌اکسید از سوخت فسیلی و تأثیر آن بر محیط زیست نیز مطرح می‌شود. در این تحقیق، با توجه به شش شاخص تعریف‌شده و بر مبنای پتانسیل استفاده از انرژی خورشیدی و امکان بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیری همچون انرژی خورشیدی، سناریوهای مدیریتی مختلف توسعه داده شده است. پس از بررسی مدل مدیریتی WEAP توسعه‌یافته در حوضه لنجانات به عنوان مطالعه موردی، توسعه مدل بارش-رواناب و کالیبراسیون آن، هشت سناریوی مختلف اعم از: ۱- سناریوی پایه (ادامه روند موجود)؛ ۲- سناریوی اول (تغییر سطح زیر کشت)؛ ۳- سناریوی دوم (افزایش راندمان آبیاری) و ۴- سناریوی سوم (استفاده از پنل خورشیدی) و سه سناریوی ترکیبی از این سناریوها و نیز سناریوی افزایش راندمان پمپ‌ها به همراه سناریوی سوم در مدل مذکور توسعه یافت و بر اساس معیارهای پایداری بررسی و ارزیابی شدند. بر اساس نتایج تحقیق، به دلیل استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی، ترکیب سناریوهای دوم و سوم به عنوان سناریوی برتر انتخاب و پیشنهاد شده است. همچنین سناریوی ادامه روند موجود به عنوان آخرین سناریوها رتبه‌بندی شده است که حاکی از بدتر شدن شرایط موجود در صورت ادامه روند فعلی است. با توجه به نتیجه رتبه‌بندی سناریوها استفاده از ترکیب سناریوهای سوم و چهارم از دیگر سناریوهای برتر انتخاب شده است.

کلمات کلیدی: هم‌بست آب-انرژی-غذا، شاخص پایداری، تصمیم‌گیری چندمعیاره، سناریونویسی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۶/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۰/۱۲

1- M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Email: m.golmohammadi@iut.ac.ir, Tel: (+98) 31-33913853, Fax: (+98) 31-33912700

3- Assistant Professor, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Ministry of Agriculture-Jihad-Iran. Email: a.nikooie@areeo.ac.ir, Tel: +98-21-22414413-17, Fax: +98-21-22400083

*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

۳- استادیار مرکز تحقیقات، ترویج کشاورزی و منابع طبیعی، وزارت جهاد کشاورزی، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

تحقیقات دوگره‌ای نکسوس، تحقیقات سه‌گره‌ای نکسوس یا تحقیقات چهارگره‌ای از آن جمله هستند. در تحقیقات دوگره‌ای می‌توان به مباحث آبیاری-انرژی، انرژی-آب، غذا-انرژی، آب-کاربری اراضی، در تحقیقات سه‌گره‌ای می‌توان به موضوعات غذا-انرژی-آب، آب-انرژی-تغییر اقلیم، کاربری اراضی-تغییر اقلیم-انرژی، محیط‌زیست-آب-تغییر اقلیم و در تحقیقات چهارگره‌ای می‌توان به آب-غذا-انرژی-تغییر اقلیم، تغییر اقلیم-اراضی کاربری-انرژی-آب اشاره نمود. باتوجه به تحقیقات اخیر می‌توان مدل مدیریتی نکسوس را به دو روش با مرکزیت و بدون مرکزیت دسته‌بندی نمود. در واقع پارامتری که به عنوان مرکز قرار می‌گیرد به عنوان عامل اصلی و بقیه عوامل در ارتباط با آن در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین باتوجه به مطالب فوق، سه مسأله اصلی که در نکسوس مطرح است را می‌توان به ترتیب زیر ارائه نمود:

- ۱) تحلیل رابطه داخلی بین بخش‌ها؛
- ۲) تحلیل تأثیر عوامل خارجی؛
- ۳) ارزیابی سیستم‌های کویل شده (Zhang et al., 2018)

(Yilmaz B et al. (2010) با پیاده‌سازی مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به کمک نرم‌افزار WEAP و تعریف شاخص‌هایی در زمینه‌های اجتماعی، اقتصادی، محیط‌زیستی به ارزیابی سناریوهای محتمل برای مدیریت منابع آب به کمک روش برنامه‌ریزی توافقی، روش وزن‌دهی ساده و غیره پرداختند. وظیفه این سناریوها نه تنها تخمین میزان بودجه آبی برای منطقه مورد مطالعه، بلکه ارزیابی تأثیرات سناریوهای مدیریتی در شرایط مختلف بوده است. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد، تصمیم‌گیری بر اساس بهترین سناریوی انتخابی تقریباً مستقل از نوع روش‌های انتخاب‌شده است و وابستگی بیشتری به وزن معیارها خواهد داشت. به تفسیر دیگر با قطعیت زیادی می‌توان راجع برای سناریوی برتر نظر داد؛ زیرا با روش‌های مختلف تصمیم‌گیری سناریو انتخاب شده است.

(Safavi and Golmohammadi (2015) با ارائه مدل یکپارچه مدیریتی منابع آب به کمک نرم‌افزار WEAP به شبیه‌سازی منابع آب در حوضه رودخانه زاینده‌رود پرداختند. در این پژوهش منابع عرضه و تقاضای آب به صورت کامل تشریح شده است. هدف اصلی از انجام این پژوهش ارزیابی آینده نزدیک حوضه با توجه به شرایط کنونی مدیریت منابع آب و تغییر اقلیم بوده است. در این پژوهش از ANFIS^۱ به جهت تولید داده استفاده شده است. نتایج نشان داد ادامه سناریوی پایه در راستای وخیم‌تر شدن وضعیت منابع آبی و کاهش سطح آب آبخوان‌ها پیش خواهد رفت و باید سناریوهای مدیریتی دیگری به

استفاده روزافزون و رو به رشد منابع آب، انرژی و غذا باعث بروز چالش به جهت استفاده پایدار از این منابع شده است. با افزایش جمعیت و تقاضا برای استفاده از خدمات و منابع، امنیت انرژی، غذا و آب رو به کاهش است. در نتیجه، برخی کمبودهای سیستمی برای مدیریت یکپارچه منابع آب، انرژی و غذا احساس می‌شود. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی به جای سوخت‌های فسیلی به مدیریت بهتر منابع آب و غذا کمک می‌کند. استفاده از این نوع انرژی‌ها در بخش تأمین انرژی کشاورزی به عنوان یک سیاست جایگزین برای تأمین انرژی باید مورد بررسی قرار بگیرد. با توجه به خشکسالی‌های مکرر در منطقه مرکزی ایران و نیاز به راهکارهای کاهش اثرات خشکسالی بر این منطقه و تبعات ناشی از آن بر تولید محصولات کشاورزی و نیز کم‌شدن ذخیره منابع آب سطحی مانند سد زاینده‌رود و پایین آمدن تراز آب‌های زیرزمینی و همچنین تبعات آن بر زندگی اقتصادی و اجتماعی مردم نیاز به پیشنهاد راهکارهایی برای توسعه پایدار و همزمان در بخش‌های انرژی و آب و غذا احساس می‌شود. یکی از مفاهیم نوظهور در کشورهای کم‌آب، مفهوم «آب مجازی» برای تعیین راهبردهای تولید کشاورزی و صنعت است. ارزیابی عملکرد سیستم تنها با در نظر گرفتن زیربخش‌های آن و در نظر گرفتن هر زیربخش به تنهایی، به سمت بهبود و توسعه پایدار در سیستم کلی نمی‌انجامد؛ از این روی، نیاز به تبیین شاخص‌هایی به جهت ارزیابی عملکرد سیستم و نحوه عرضه و تقاضا در بخش‌های آب، انرژی و غذا است. هم‌بست آب-انرژی-غذا به عنوان یک رویکرد نوین در مسائل مرتبط با مدیریت به هم پیوسته منابع آب-انرژی-غذا مطرح شد. تلاش‌های بسیار زیادی برای بررسی این مدل از جنبه‌های متنوع اعم از محاسبات جریان مصرف منابع و ارزیابی عملکرد تکنولوژی صورت گرفته است. با توجه به تفاسیر محققان در زمینه‌های مختلف علمی تعاریف زیادی از نکسوس وجود دارد. اما به صورت عمومی نکسوس در دو دسته اصلی تعریف می‌شود: ۱) واکنش بین زیر سیستم‌ها با توجه به سیستم بزرگتر که در واقع این تعریف مبین تعامل بین سه بخش آب، غذا و انرژی برای رسیدن به مشخصات پیچیده یک سیستم یکپارچه همگانی است. نکسوس به عنوان عامل وابستگی هم‌زمان بین بخش انرژی و آب و کوپل کردن هم‌زمان تولیدات، روش‌ها، توزیع و نحوه استفاده از منابع شمرده می‌شود و وقتی صحبت از غذا شود به یک چرخه کامل تبدیل می‌شود. ۲) تعریف دوم که به معنی تحلیلی برای نزدیک شدن به گره‌های مدیریتی نکسوس (که همان آب، غذا و انرژی است) مرسوم‌تر خواهد بود. در تحقیقات اخیر سؤالات زیادی در زمینه چگونگی ارتباط بین اجزای نکسوس مطرح شده است که

جهت تغییر و بهبود اوضاع حوضه تدوین شود. در سال ۲۰۰۸ برای اولین بار نکسوس در سازمان ملل مطرح شد (Smajgl et al., 2016).

(Bruin et al., 2015) از موسسه SEI^۲ به بررسی رویکرد آب-انرژی-غذا-محیط زیست در کشور اتیوپی و زیر حوضه تنا پرداختند. کشور اتیوپی به عنوان یک کشور در حال توسعه شناخته شده است که تلاش می‌کند تا سال ۲۰۲۵ به یک کشور با درآمد متوسط تبدیل شود. به همین جهت به دنبال تکنولوژی‌های جدید برای پیشرفت بخش کشاورزی خود برای نیل به تولید بیشتر و درآمد اقتصادی بیشتر است. در این پژوهش به ارزیابی و مقایسه سناریوهای مختلف مدیریتی و رابطه بین بخش‌های مختلف به کمک بسته نرم‌افزاری ترکیبی WEAP-LEAP و همچنین توسعه سه سناریو برای آینده پرداختند. یک سیستم نکسوس با توجه به تعریف این پژوهش به صورت شکل ۱ ارائه شده است.

باید توجه شود که کدام زیربخش از کدام یک از بخش‌های اصلی آب-انرژی-غذا به عنوان منبع تأمین‌کننده در نظر گرفته شده است. پایداری نکسوس را می‌توان به عنوان احتمال تأمین تقاضاهای بخش آب، انرژی و غذا به صورت زیر تعریف کرد:

$$\text{Availability} = \text{SI}_i = \Pr(\text{Demand}_t \leq \text{Supply}_t) \quad (1)$$

که i بیانگر بخش موردنظر و t بیانگر زمان است. در واقع در اینجا پایداری احتمال موفقیت سیستم را نشان می‌دهد. پایداری سیستم باید در سه سطح مورد بررسی قرار گیرد:

الف) پایداری کلی سیستم آب-انرژی-غذا؛ ب) پایداری هر بخش آب-انرژی-غذا و ج) پایداری زیر بخش‌های هر کدام از بخش‌ها

پایداری از جنبه قابلیت اعتمادپذیری در حجم یا مقدار به آن پرداخته شده است و به دیگر جنبه‌های پایداری منابع آب-انرژی و غذا اشاره نشده است.

(Degirmencioglu et al., 2019) به ارزیابی پایداری تولید محصولات کشاورزی در زیر حوضه گدیز واقع در کشور ترکیه پرداختند. این پژوهش سناریوهای آینده برای استفاده بهینه و پایدار از منابع آب، انرژی و غذا را گسترش می‌دهد. اطلاعات مربوط به حوضه گدیز در سال ۲۰۱۴ استفاده شده است تا سناریوهایی برای آینده شامل تغییر اقلیم، گسترش مناطق شهری، تغییر در منابع آب و تغییر در تکنولوژی‌های کشاورزی در نظر گرفته شود.

(Karan and Asadi, 2018) به ارزیابی کمی آب-انرژی-غذا بر مبنای شاخص‌های پایداری منابع پرداختند. افزایش هزینه آب، انرژی و کاهش سوخت‌های فسیلی پایداری سیستم آب-انرژی-غذا را در درازمدت با چالش روبرو کرده است. سؤال اساسی این است: "این پایداری کلی سیستم چگونه قابل اندازه‌گیری است؟". برای این منظور فرمولی برای پایداری کلی سیستم ارائه شده است. در این نوع پایداری

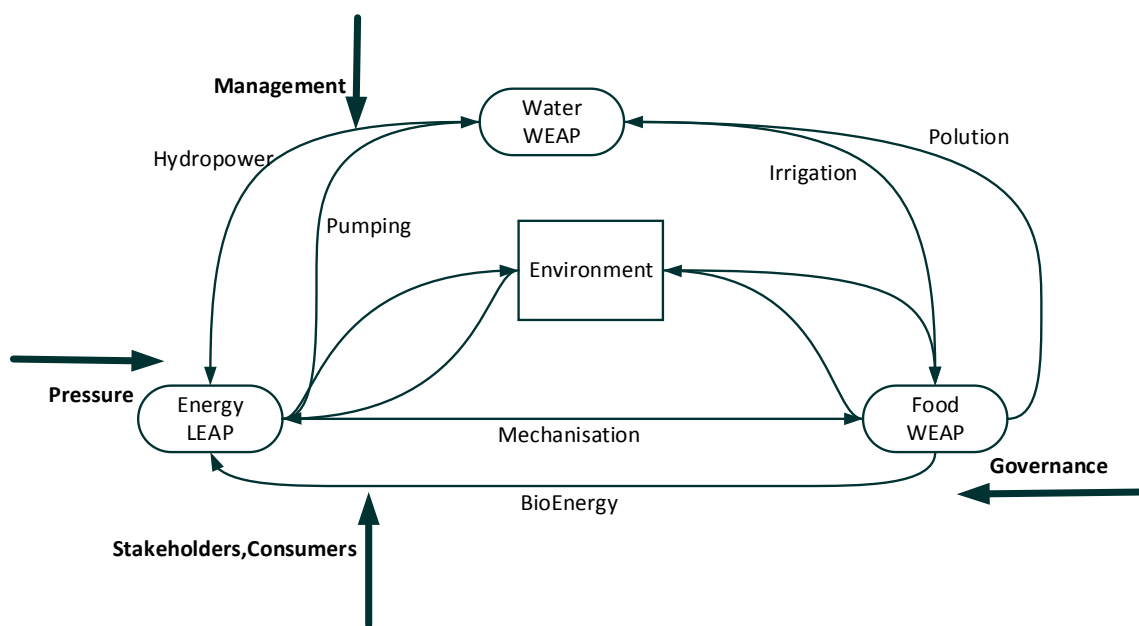


Fig. 1- WEAP-LEAP conceptual model (Bruin et al., 2015)
شکل ۱- مدل مفهومی WEAP-LEAP (Bruin et al., 2015)

همچنین در افزایش استفاده از پنل‌های خورشیدی در سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۴۰ و ۲۰۵۰ به ترتیب ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خواهد بود. برای سناریوهای آینده نزدیک و همین‌طور در گذشته تنها شاخص پایداری قابل اعمال است.

وزن قسمت‌های مختلف پایداری با توجه به اهمیت آن‌ها مشخص شده است. افزایش جمعیت در منطقه مورد مطالعه می‌تواند باعث کاهش تأمین غذا برای مردم منطقه باشد. این امر همچنین باعث کاهش خودکفایی و افزایش واردات محصولات کشاورزی خواهد شد. نکته دیگر این است که ممکن است افزایش استفاده از آب‌های سطحی تأثیر چندانی در پایداری نداشته باشد ولی این کار به صورت غیرمستقیم باعث افزایش در سطح آب‌های زیرزمینی خواهد شد؛ زمانی که این مهم اتفاق بیفتد، استحصال آب از آب‌های زیرزمینی نیز متعاقباً به انرژی کمتری نیاز دارد. استفاده از سلول‌های خورشید برای پمپاژ نیز به همین صورت منطقی و قابل توجیه است. کاهش خودکفایی محصولات می‌تواند به کمک افزایش کاشت محصولات مقاوم در برابر خشکسالی زیاد شود. این قضیه‌ای است که باید به آن توجه جدی شود. محققین بر این باورند که استفاده از آبیاری قطره‌ای برای بسیاری از محصولات کشاورزی باعث کاهش در مصرف آب می‌شود. مطلب دیگر فرض خطی بودن رابطه بین زمین زیر سطح کشت و ضریب خودکفایی محصولات است که باید بهبود داده شود. یکی دیگر از رویکردهای شبیه‌سازی سیستم استفاده از رویکرد پویایی سیستم برای مدل‌سازی آب-انرژی-غذا می‌باشد. (Arshadi et al. (2014 با تمرکز تحقیقات خود بر حوضه آبریز کارون بزرگ و استفاده از انرژی برقایی که تأمین کننده ۷۸ درصد از انرژی برقایی کشور و همچنین ۱۳ درصد از تولیدات غذایی کشور، نقش مهمی در تأمین غذا و انرژی کشور دارد. هدف از این تحقیق بررسی روندها و علل آسیب‌پذیری حوضه کارون بزرگ با تمرکز بر کیفیت منابع آب به کمک رویکرد پویایی سیستم بوده است. نتایج تحقیق بیانگر این بود که خطرات و سناریوهای بیرونی در مقایسه با سیاست حاکم بر کشاورزی، صنعت و خدمات تأثیر ناچیزی بر کیفیت آب دارد. این مطلب نشان می‌دهد که در راستای کاهش آسیب‌پذیری سیستم باید تمرکز بر سیاست‌های اعمالی برای تأمین غذا و انرژی در حوضه داشت.

با توجه به تحقیقات ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت در شماری از پروژه‌های مرتبط با آب-انرژی-غذا به مدل‌سازی سیستم و شبیه‌سازی فرآیند پرداخته شده است. در شماری دیگر از تحقیقات به محاسبه شاخص‌های بدون شبیه‌سازی و در نظر گرفتن مفاهیم پایداری و توسعه پایدار پرداخته‌اند. در پژوهش حاضر و با توجه به زمان و داده‌های

نتایج پژوهش حاکی از آن است که با افزایش شهرنشینی کاهش زمین برای کشاورزی و با تغییر اقلیم، کاهش منابع آب انکارناپذیر به نظر می‌آید. سیاست‌های کشت مستقیم و استفاده از آبیاری قطره‌ای پیشنهاد شده است. در سناریو پایه تأمین انرژی برای استحصال آب سطحی و زیرزمینی بدون در نظر گرفتن انرژی خورشیدی مورد توجه است. در سناریو ۱ با فرض اینکه ۵ درصد از انرژی برای پمپاژ به کمک پنل‌های خورشیدی تأمین می‌شود، در نظر گرفته شده است. در سناریو ۲ گرم‌ترین فصل (تابستان) بدون استفاده از پنل‌های خورشیدی در نظر گرفته شده است. در سناریو ۳ تأثیر پنل‌های خورشیدی در تأمین انرژی مورد نیاز برای پمپاژ آب زیرزمینی ۵ درصد در نظر گرفته شده‌اند. در سناریو ۴ میزان سطح زیر کشت ۳/۷۲ درصد کاهش یافت و تأثیر آن در تولید دیده شد. در سناریوها نسبت درصد منابع مختلف آب سطحی و زیرزمینی تغییر می‌کند. نتایجی که از این تحقیق گرفته شد، به شرح زیر است:

- ۱) منبع انرژی برای تولید محصول، نفت خام و گاز طبیعی می‌باشد؛ انرژی خورشیدی به عنوان یک گزینه مناسب مخصوصاً برای پمپاژ آب زیرزمینی مطرح است؛
- ۲) ضریب خودکفایی محصولات و همچنین پایداری محصولات در افق دراز مدت برای منطقه مورد نظر رو به کاهش است؛
- ۳) فعالیت‌های محیط‌زیست‌دوستانه باید افزایش پیدا کند؛ این جز با کاهش استفاده از منابع خام و افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیری همچون منابع خورشیدی و بادی محقق نمی‌شود. افزایش استفاده از نیروهای خورشیدی باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به خصوص کربن‌دی‌اکسید خواهد شد.

قابل ذکر است در این پژوهش یک روش برای آنالیز حساسیت سناریوهای مختلف ارائه شده است. آنالیز حساسیت بین سناریو پایه و بین سناریوهای جدید به کمک رابطه زیر ارزیابی می‌شود:

$$SA_r = \left(\frac{O_i - O_b}{P_{b \pm \Delta} - P_b} \right) \frac{P_b}{O_b} \quad (2)$$

O_i خروجی سناریو جدید، O_b خروجی سناریو پایه، P پارامتر سناریو جدید، P_b پارامتر در سناریو پایه، b میانگین اولیه اعداد، و Δ تغییر در پارامترها از حالت پایه است. در کل سناریوها بر دو اساس آینده نزدیک و آینده دور توسعه داده شدند. آینده نزدیک تا سال ۲۰۲۰ و آینده دور افق سال‌های ۲۰۴۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ است. سناریوهای آینده دور در واقع تأثیر گسترش شهرنشینی (تغییر کاربری اراضی)، تغییر اقلیم و پیشرفت روش‌های جدید در زمینه کشاورزی است. ضریب خودکفایی به صورت کلی در منطقه مورد بحث کاهش پیدا می‌کند که این خود باعث کاهش در صادرات منطقه می‌شود. در بعضی از سناریوها افزایش درصد استفاده از آب‌های سطحی از ۴۲ به ۵۳ درصد خواهد بود.

اهداف تبیین شده و حساسیت نسبت به مقادیر کلیدی عدم قطعیت توسعه داده می‌شوند.

۲-۲- الگوریتم شبیه‌سازی بارش-رواناب

دو روش برای در نظر گرفتن آبیاری در WEAP وجود دارد که به شرح زیر است:

الف) در نظر گرفتن نیاز آبیاری به عنوان گره تقاضا و به صورت مستقیم میزان آب برداشت شده برای تخصیص بخش کشاورزی وارد می‌شود. این کار به کمک گره‌های نیاز انجام می‌پذیرد.

ب) در نظر گرفتن نیاز آبی گیاهان: به WEAP اجازه داده می‌شود که خود میزان آب برداشتی برای محصولات کشاورزی را بر اساس پارامترهای مؤثر بر رشد گیاه در نظر بگیرد. این کار به کمک تعریف حوضه‌ها در محیط نرم‌افزار امکان پذیر است. روش "ب" روش مطمئن‌تری است و جواب‌های قابل اتکا و با جزئیات بیشتری ارائه می‌دهد.

یکی از مسائل با اهمیت در پژوهش‌های مرتبط با آب مجازی مشخص کردن مرز منطقه مطالعاتی است که می‌تواند در مقیاس منطقه‌ای، کشوری یا حتی جهانی در نظر گرفته شود (Feng, 2012). از آنجایی که مرزها و تقسیم‌بندی‌های سیاسی با تقسیم‌بندی‌های هیدرولوژیکی ممکن است فرق داشته باشد، باید مرزهای منطقه مورد مطالعه به گونه‌ای انتخاب شود که بین مرزهای سیاسی و هیدرولوژیکی تا حدود زیادی انطباق وجود داشته باشد. این موضوع از این بابت حائز اهمیت است که مدل‌سازی محصولات کشاورزی و محاسبه آب مجازی آن‌ها بر اساس تقسیمات سیاسی شهرستان‌ها ارائه می‌شود؛ یکی از علت‌های انتخاب زیرحوضه لجنانات تطابق تقریباً بسیار زیاد مرزهای هیدرولوژیکی و تقسیمات سیاسی در این محدوده است.

روش‌های مدل‌سازی بارش-رواناب در مدل WEAP می‌شود؛ در نرم‌افزار WEAP از ۵ روش استفاده شده است که به شرح الف) روش فقط نیاز آبیاری (ضرایب ساده‌شده)؛ ب) روش بارش-رواناب (ضرایب ساده‌شده)؛ ج) روش رطوبت خاک؛ د) روش MABIA و ه) روش PGM^۳ می‌باشند. روش محتوای رطوبتی خاک، روش سوم به کار گرفته شده در مدل‌سازی بارش-رواناب در نرم‌افزار WEAP است. این روش از لحاظ الگوریتم‌های محاسباتی از دو روش اول پیچیده‌تر بوده و نوعی مدل نیمه توزیعی به حساب می‌آید. به تبع پیچیده‌تر بودن آن خروجی‌های متنوع‌تری نیز از آن می‌توان استخراج نمود. در این روش فرض بر این است که خاک از دولا به تشکیل شده است. لازم به ذکر

موجود، در ابتدا به شبیه‌سازی سیستم در بخش آب و غذا به کمک بسته نرم‌افزاری WEAP و نیز تدوین سناریوهای در نظر گرفتن پتانسیل انرژی خورشیدی و سپس به ارائه و محاسبه شاخص‌ها و در نهایت با تدوین سناریوهای محتمل به وزن دهی به شاخص‌ها پرداخته شده است. در پژوهش‌های قبلی دو مرحله شبیه‌سازی و اعمال شاخص‌ها با روش‌های مختلف و توسعه مفاهیم پایداری برای دیگر منابع کمتر به آن پرداخته شده است.

۲- روش و فرآیند تحقیق

روند افزایشی استفاده از منابع آب سطحی و زیرزمینی، باعث افزایش تولید محصولات کشاورزی می‌شود. از آنجایی که افزایش تولید محصولات نیز تأثیرگذار بر استفاده از منابع انرژی به جهت استحصال آب سطحی و زیرزمینی است، مدیریت یکپارچه آب-انرژی و غذا امری ضروری به نظر می‌رسد. در این قسمت ابتدا بسته نرم‌افزاری WEAP معرفی شده است؛ سپس الگوریتم بارش-رواناب توسعه داده شده تشریح شده است. در ادامه پس از کالیبراسیون مدل، مفاهیم و روابط مرتبط با پایداری سیستم‌های آب-انرژی-غذا و روابط تجارت آب مجازی و انتشار کربن دی‌اکسید توسعه داده شده است. در نهایت روش وزن دهی مناسب به جهت جمع‌بندی شاخص‌های پایداری و رده‌بندی و انتخاب سناریوی برتر مدیریتی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- مراحل مدل‌سازی در WEAP

اولین گام در مدل‌سازی به کمک WEAP، تعیین گام زمانی و دوره شبیه‌سازی و مرزهای منطقه مطالعاتی می‌باشد. ساختار گرافیکی نرم‌افزار به کاربر این امکان را می‌دهد که اجزای سیستم، همچون رودخانه‌ها، آبخوان‌ها، حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها و نقاط نیاز و منابع را با توزیع مکانی مشخص کند. سپس مدل بر اساس سری سناریوی تعریف شده مدل‌سازی را بر اساس گام‌های زمانی مورد نظر انجام خواهد داد (Varela-Ortega et al., 2011). گام‌های زمانی می‌تواند به صورت روزانه، هفتگی، ماهانه، فصلی، سالانه و ترکیبی از این‌ها برای حال و آینده باشد.

WEAP در ابتدا یک سال را به عنوان سال پایه یا موقعیت فعلی در نظر می‌گیرد و سپس سناریوها نسبت به سال مبنا و بر اساس گزینه‌های مختلف اعم از سیاست‌ها و استراتژی‌های مدیریتی و روند هیدرولوژیکی و تکنولوژیکی برای دوره شبیه‌سازی یا برای آینده نزدیک یا دور مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرند (Sieber, 2005). سناریوها بر اساس معیارهای میزان تأمین، هزینه و سود، سازگاری با

است به کمک روش مذکور می‌توان محاسبات مربوط به هیدرولوژی برف را نیز محاسبه کرد. در لایه بالای خاک با توجه به آبیاری و بارش بر روی زمین‌های کشاورزی و غیر کشاورزی، رواناب‌های سطحی و جریان‌های ورودی و تغییر در محتوای رطوبتی خاک به شبیه‌سازی تبخیر و تعرق می‌پردازد.

۳-۲- پایداری منابع آب- غذا- انرژی

هدف اصلی از پایداری سیاست‌های مدیریتی در بخش‌های مختلف آب-انرژی-غذا کاهش اعمال سیاست‌هایی است که تأثیر منفی بر روی منابع آب-انرژی-غذا در حال و آینده می‌گذارد؛ در نقطه مقابل به دنبال توسعه سیاست‌هایی است که هدف آن افزایش اثرات مثبت از لحاظ اجتماعی، اقتصادی، سیاسی، حکمرانی و غیره می‌باشد. پایداری سیستم‌های آب-انرژی-غذا می‌تواند از منظر امنیت آب-انرژی-غذا و توسعه پایدار مدنظر قرار بگیرد. هدف از اعمال شاخص‌های مختلف و روابط پایداری در زمینه‌های مختلف آب-انرژی-غذا ارزیابی عملکرد سیستم بر اساس سناریوهای مدیریتی آینده یا سناریوهای مدیریتی قابل اعمال در گذشته^۴ است.

۳-۲-۱- پایداری سیستم منابع آب

مدیریت بهم‌پیوسته و یکپارچه منابع آب به صورت صریح حکمرانی‌های سنتی بر منابع آب را به چالش می‌کشد و اعلام می‌دارد نیازمند به یک سیستم یکپارچه به جهت مقیاس کردن آن در اندازه‌ها و شکل‌های مختلف است. معیارهای عملکرد سیستم‌های منابع آب همچون اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری در نظر گرفته می‌شود. این معیارها به صورت غیرفازی در محاسبات اشکالاتی را ایجاد می‌کنند. استفاده از معیارهای عملکرد در بخش انرژی و غذا با تغییر در مفاهیم آنها همراه است. شاخص‌هایی که در بخش غذا استفاده می‌شوند، معمولاً بر مبنای عرضه و تقاضا و نسبت آن‌ها به کار می‌روند. در این پژوهش علاوه بر این نسبت که تحت عنوان قابلیت در حجم یا مقدار در سیستم‌های پایداری منابع آب تعریف می‌شود، دیگر مفاهیم نیز در بخش غذا و انرژی بر اساس توسعه پایدار قابل تعریف است.

شاخص پایداری منابع آب کارایی گزینه‌های مختلف مدیریتی را از منظر آب و محیط‌زیست تعیین می‌کند که اولین بار توسط Loucks (1997) و به صورت ضرب سه معیار اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و کسر آسیب‌پذیری از یک ارائه شد. در این رابطه اگر یکی از معیارهای عملکردی صفر باشند، کل شاخص پایداری برابر با

صفر خواهد شد (Sandoval-Solis, 2011). ضرب این مقادیر به این شکل به این معنی است که باید حتماً همه مقادیر وجود داشته باشند یا صفر نباشند تا جواب مطلوب حاصل شود. (Sandoval-Solis (2011) شاخص پایداری را به صورت میانگین هندسی معیارهای عملکردی سیستم بیان نمود:

$$SI^j = [Rel^j \times Res^j \times (1 - Vul^j)]^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

رابطه بالا دارای دو ویژگی مهم می‌باشد:

الف) این رابطه این امکان را به کاربر و پژوهش‌گر برای توسعه روابط در سطوح دیگر و منابع طبیعی دیگر همچون غذا و انرژی می‌دهد؛
ب) انعطاف‌پذیری: می‌توان به فراخور اهداف پژوهش و کاربرد معیارهای مختلف، معیارهای عملکردی مختلف را به رابطه اضافه یا کم کرده و محاسبات را انجام داد.

در مقیاس کلان در نظر گرفتن مطلوبیت بر مبنای عرضه یا تأمین شده و تقاضا یا مورد نیاز استوار می‌باشد. در حالت عمومی در یک سیستم میزان کمبود (اضافه تولید) به صورت زیر قابل تعریف است:

$$D_i = \begin{cases} 0 & \text{if Demand}_t^{\text{water}_j} = \text{Supply}_t^{\text{water}_j} \\ \text{Deficit} = \text{Demand}_t^{\text{water}_j} - \text{Supply}_t^{\text{water}_j} & \text{if Demand}_t^{\text{water}_j} > \text{Supply}_t^{\text{water}_j} \end{cases} \quad (4)$$

در این رابطه $\text{Supply}_t^{\text{Water}_j}$ و $\text{Demand}_t^{\text{Water}_j}$ به ترتیب برابر نیاز و تأمین آن در زمان t برای مصرف‌کننده آب زام است. در سیستم‌های منابع آب و مخصوصاً در فلات مرکزی ایران هیچ‌گاه میزان تأمین آب از میزان تقاضای آب بیشتر نخواهد شد و ایده‌آل‌ترین حالت، برابری عرضه و تقاضا در بخش آب است. یعنی پایداری سیستم‌های منابع آب از ۱۰۰ درصد فراتر نخواهد رفت و سیستم‌های منابع آب همیشه دچار کسری تأمین هستند. با توجه به موارد مطرح شده بدیهی است که اگر میزان تأمین بیشتر از میزان مورد نیاز بود، طبق رابطه (۴) میزان کمبود برابر با صفر خواهد بود. در ادامه به بیان مفاهیم مرتبط با پایداری اشاره می‌شود:

الف) اطمینان‌پذیری: اطمینان‌پذیری یا قابلیت اعتماد نشان می‌دهد با چه احتمالی آب اختصاص یافته به مصرف‌کننده خاص نیاز آن را تأمین خواهد کرد (Sandoval-Solis, 2011)؛ مفهوم اطمینان‌پذیری یا قابلیت اعتماد، برابر احتمال این است که آب تخصیصی به مصرف‌کننده زام نیاز آن را به طور کامل برطرف کند؛ به عبارت دیگر تا چه میزان سیستم بدون شکست می‌تواند به کار خود ادامه دهد.

قابلیت اعتماد به دو دسته تقسیم می‌شود:

(MacMahon, 2006). در تعریف اول نسبت کل کمبودها به تعداد گام‌هایی که در آن‌ها کمبود اتفاق افتاده تقسیم بر کل میزان تقاضای کاربر که در یک دوره شبیه‌سازی وجود داشته است؛ تعریف می‌شود:

$$Vul^j = \frac{\sum_{t=1}^T (D_t^j | D_t^j > 0)}{\sum_{t=1}^T N(D_t^j > 0) \times \sum_{t=1}^T Demand_t^j} \quad (8)$$

$$\times 100\% \quad \forall t = 1, 2, \dots, T; \quad 0 \leq Vul^j \leq 100$$

برای توسعه روابط مربوط به معیارهای عملکرد بر اساس تئوری فازی، ابتدا باید یک تابع مطلوبیت تعریف شود. تابع بل برای محاسبه درجه عضویت در نظر گرفته شده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu(x) = \text{bell}(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (9)$$

در رابطه (9) a و b و c پارامترهای تابع هستند که با تغییر در آن‌ها می‌توان به سطوح مختلفی از رضایت‌مندی دست یافت. این پارامترها می‌تواند بر اساس نظر کارشناسان خبره نیز تعریف شود و در هر مورد و به فراخور کاربرد در زمینه آب-انرژی-غذا متفاوت باشد. روابط به صورت زیر فرمول‌بندی شده‌اند:

$$Rel_j = \frac{\sum_t \mu^j(x_t)}{N} \times 100 \quad 0 \leq Rel^j \leq 100 \quad (10)$$

$$Res^j = \frac{\sum_t (\mu^j(x_t) - \mu^j(x_{t-1})) | \mu^j(x_t) > \mu^j(x_{t-1}))}{\sum_t (1 - \mu^j(x_t))} \times 10 \quad 0 \leq Res^j \leq 100 \quad (11)$$

$$Vul^j = \max_t (1 - \mu^j(x_t)) \quad 0 \leq Vul^j \leq 100 \quad (12)$$

استفاده از روابط فازی و توابع عضویت فازی می‌تواند به درک بهتر و صحیح‌تر سیستم مخصوصاً در مقادیر حدی و آستانه‌ای کمک شایانی کند. در استفاده از تابع عضویت زنگوله‌ای در این پژوهش و در قسمت آب باید توجه داشت که با توجه به تعاریف انجام‌شده مقادیر a و b و c ثابت در نظر گرفته شده‌اند و تنها مقادیر a تغییر می‌کنند. راجع به این مورد در قسمت پایداری غذا بیشتر توضیح داده خواهد شد.

۲-۳-۲- محتوا و تجارت آب مجازی

مفهوم آب مجازی توسط پژوهشگر بریتانیایی، پروفیسور جان انتونی در دهه ۱۹۹۰ میلادی مطرح شد؛ در پی آن توجه اغلب پژوهشگران و محققان کشورهای مختلف در زمینه منابع آب را به خود جلب کرد؛ در نتیجه آن تحقیقات گسترده‌ای با استفاده از این مفهوم در جهت ارائه راهکارهای مدیریتی به خصوص در مجموعه منابع آب منتشر شد. مزیت مهم در استفاده از مفهوم آب مجازی وارد کردن محصولاتی است که برای تولید آن‌ها در داخل کشور منابع آب زیادی مصرف می‌شود و باید این محصولات را از کشورهای با منابع غنی آب وارد

الف-۱) قابلیت اعتماد در زمان^۵: نسبت تعداد گام‌های زمانی که نیاز مصرف‌کننده در طول دوره شبیه‌سازی به طور کامل تأمین شده ($D_t^j = 0$) به تعداد کل دوره شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد. رابطه (۵) نشان‌دهنده اعتمادپذیری در زمان می‌باشد:

$$Rel_{time}^j = \frac{N_s}{T} \times 100 \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad 0 \leq Rel_{time}^j \leq 100 \quad (5)$$

در این رابطه N_s بیانگر تعداد دفعات زمانی است که نیاز مصرف‌کننده زام به طور کامل تأمین شده است یا کمبود صفر بوده است؛ T بیانگر تعداد کل مراحل زمانی شبیه‌سازی است.

الف-۲) قابلیت اعتماد در حجم^۶: از طرف دیگر قابلیت اطمینان حجمی به صورت حجم کل آب تأمین‌شده به حجم کل آب مورد نیاز برای یک مصرف‌کننده در دوره زمانی شبیه‌سازی قابل تعریف است که با استفاده از رابطه (۶) قابل محاسبه است:

$$Rel_{Volume}^j = \frac{\sum_{t=1}^T Supply_t^j}{\sum_{t=1}^T Demand_t^j} \times 100 \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad 0 \leq Rel_{vol}^j \leq 100 \quad (6)$$

ب) انعطاف‌پذیری^۷: برگشت‌پذیری یا انعطاف‌پذیری، احتمال بازگشت سیستم به حالت مطلوب پس از یک شکست را گویند. از آنجایی که سیستم‌های منابع مختلف، از جمله منابع آب دارای حالت عدم قطعیت هستند و شرایط آن در بسیاری از مواقع ثابت نیست، برگشت‌پذیری به عنوان یک مشخصه آماری برای بررسی انعطاف‌پذیری سیستم نسبت به تغییر شرایط یا حتی تغییر سیاست‌های مدیریتی در نظر گرفته می‌شود. برای یک سیستم منابع آب مشخص برگشت‌پذیری برابر است با تعداد گام‌های زمانی که در طول دوره شبیه‌سازی سیستم از حالت شکست به حالت مطلوب بر می‌گردد؛ به تعداد کل گام‌هایی که در آن سیستم دچار کمبود است (Sandoval-Solis, 2011). رابطه آن به صورت زیر قابل تعریف است:

$$Res^j = \frac{\sum_{t=1}^T N(D_{t+1}^j | D_t^j > 0)}{\sum_{t=1}^T N(D_t^j > 0)} \times 100\% \quad \forall t = 1, 2, \dots, T; \quad 0 \leq Res^j \leq 100 \quad (7)$$

$\sum_{t=1}^T N$ تعداد گام‌های زمانی است که در آن شرط پراتنز محقق شده است.

د) آسیب‌پذیری^۸: این مفهوم میزان کمبودها در یک سیستم را مشخص می‌کند و نشان‌دهنده شدت شکست‌ها در یک سیستم است و می‌تواند به عنوان میانگین شکست‌ها و احتمال بیشتر شدن کمبود در یک یا چند دوره از یک حد معین را نشان می‌دهد

و تقاضا و همچنین تجارت آب مجازی که همان صادرات یا واردات آب مجازی می‌باشد. البته باید یادآور شد ارتباط مستقیم و غیر مستقیم بین آب مجازی و دیگر شاخص‌ها بررسی خواهد شد. روابط از قرار زیر خواهند بود:

$$D_i = \begin{cases} 0 & \text{if Demand}_t^{\text{Food}_j} = \text{Supply}_t^{\text{Food}_j} \\ \text{Deficit} = \text{import} = \text{Demand}_t^{\text{Food}_j} - \text{Supply}_t^{\text{Food}_j} & \text{if Demand}_t^{\text{Food}_j} > \text{Supply}_t^{\text{Food}_j} \text{ or} \\ \text{Surplus} = \text{export} = \text{Supply}_t^{\text{Food}_j} - \text{Demand}_t^{\text{Food}_j} & \text{if Demand}_t^{\text{Food}_j} < \text{Supply}_t^{\text{Food}_j} \end{cases} \quad (17)$$

با توجه به رابطه (۱۷) کمبود به عنوان واردات محصولات در نظر گرفته شده است. نکته بسیار مهم در این بخش و تفاوت اصلی با بخش پایداری منابع آب این است که با توجه به واقعیت موجود در منطقه و تخصیص آب، پایداری سیستم‌های منابع آب هیچ موقع نمی‌تواند از ۱۰۰ درصد فراتر برود. اما پایداری سیستم غذا با توجه به عرضه و تقاضا و مفهوم تجارت آب مجازی می‌تواند کمتر از ۱۰۰ درصد یا بیشتر از ۱۰۰ درصد باشد. برای اعمال این مفهوم باید برای پایداری کمتر از ۱۰۰ درصد از همان تابع عضویت فازی زنگوله‌ای شکل (تابع مطلوبیت زنگوله‌ای) و برای بیشتر از ۱۰۰ درصد از تابع عضویت خطی استفاده شود. علت استفاده از تابع خطی این است که شیب این خط باید برابر با ۱ باشد تا مفهوم عرضه و تقاضا را بتواند به درستی انتقال دهد و نیز نسبت $\frac{\text{Supply}}{\text{Demand}}$ در تأمین ۱۰۰ درصد باید برابر با عضویت ۱ باشد.

الف) معیار قابلیت اعتمادپذیری:

الف-۱) اعتمادپذیری در زمان: تعریف اولیه به صورت نسبت تعداد گام‌های زمانی که نیاز مصرف‌کننده در طول دوره شبیه‌سازی به طور کامل تأمین شده ($D_t^j = 0$) به تعداد کل دوره شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد. با توجه به تعریف کمبود یا اضافه تولید در ابتدای این تعریف به کمک رابطه فازی باز تعریف می‌شود. در واقع با توجه به مفهوم فازی این مقدار در تقریباً هیچ موردی برابر صفر نیست و باید مقادیر تابع عضویت با هم جمع شوند. رابطه زیر نشان‌دهنده اعتمادپذیری در زمان می‌باشد. با توجه به این که کلیت روابط در بخش پایداری منابع آب توضیح داده شده است، در این قسمت از تکرار روابط قبل خودداری نموده و فقط قسمت‌های متفاوت و روابط فازی نهایی استفاده شده بیان می‌شود:

$$\text{Rel}_j = \frac{\sum_t \mu^j(x_t)}{N} \times 100 \quad \text{Rel}_j \geq 0 \quad (18)$$

الف-۲) اعتمادپذیری در حجم: از طرف دیگر قابلیت اطمینان حجمی به صورت مقدار کل غذای تأمین شده به مقدار کل غذای مورد نیاز

کرد تا بتوان بهینه‌تر از منابع آب استفاده کرد. "آب مجازی" به معنی حجم آب مصرف‌شده در تولید محصولات است که دورنمای جدیدی در مباحث مربوط به کمبود آب مطرح می‌کند. مفهوم آب مجازی از دو منظر تولید و مصرف قابل بررسی است. "تجارت آب مجازی" به عنوان آب نهان در محصولات کشاورزی یکی از مفاهیم مهم در محاسبات مربوط به آب مجازی است. محاسبات مربوط به محتوای آب مجازی به صورت معادلات زیر انجام می‌شود. تبخیرآبی و تبخیرسبز نیز به صورت زیر انجام می‌شود:

$$ET_{\text{Blue}} = \max(0, ET_c - P_{\text{eff}}), ET_{\text{Green}} = \min(ET_c, P_{\text{eff}}) \quad (13)$$

$$CWU_{\text{Blue},i} = 10 \times ET_{\text{Blue}}, CWU_{\text{Green},i} = 10 \times ET_{\text{Green}} \quad (14)$$

$$VWC_{\text{Blue}} = \frac{CWU_{\text{blue},i}}{Y_i}, VWC_{\text{Green}} = \frac{CWU_{\text{green},i}}{Y_i}, VWC_T = VWC_B + VWC_G \quad (15)$$

$$VWFlow = \sum_{i=1}^n D_i \times VWC_T \quad (16)$$

منظور از آب سبز حداقل دومقدار بارش مؤثر یا تبخیر و تعرق است. منظور از آب آبی، آب حاصل از آبیاری و رواناب سطحی که معادل با اختلاف تبخیر و تعرق و بارش مؤثر است (Fu et al., 2018). P_{eff} بارش مؤثر، ET_{Blue} تبخیر آبی، ET_{Green} تبخیر سبز، $CWU_{\text{Blue},i}$ نیاز آبی محصولات، $CWU_{\text{Green},i}$ نیاز آبی محتوای آب مجازی VWC_{Blue} محتوای آب مجازی آبی، VWC_{Green} محتوای آب مجازی سبز و Y_i عملکرد محصولات است. D_i نیز به عنوان تفاوت عرضه و تقاضا محصولات کشاورزی در نظر گرفته شده است. با ضرب عدد مربوط به تبخیر سبز و آبی در عدد ۱۰ نیاز آبی محصولات بر مبنای متر مکعب بر هکتار بدست می‌آید. منظور از محتوای آب مجازی آبی آن قسمتی از محتوای آب مجازی برای محصول است که از آب حاصل از آبیاری یا رواناب سطحی بدست آمده است. منظور از محتوای آب مجازی سبز آن قسمتی از محتوای آب مجازی است که از حداقل بارش مؤثر یا تبخیر و تعرق بدست آمده است.

۳-۳-۲- پایداری سیستم منابع غذا

پس از مدل‌سازی محصولات زراعی و باغی منتخب به کمک روش محتوای رطوبت خاک و مفاهیم مطرح‌شده برای معیارهای عملکرد به باز تعریف این مفاهیم پرداخته می‌شود. محصولات کشاورزی مورد استفاده در بازه زمانی پژوهش، محصولات منتخب بر اساس محتوای آب مجازی و همچنین میزان تولید آن‌ها در زیر حوضه لنجان و شهرستان‌های مبارکه، لنجان و دهقان بودند. با توجه به مفهوم عرضه

برای یک مصرف کننده در دوره زمانی شبیه سازی قابل تعریف است که با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\text{Rel}_{\text{Volume}}^j = \frac{\sum_{t=1}^T \text{Supply}_t^j}{\sum_{t=1}^T \text{Demand}_t^j} \times 100 \quad \forall t \quad (19)$$

$$= 1, 2, \dots, T \quad \text{Rel}_{\text{Vol}}^j \geq 0$$

الف-۳) **انعطاف پذیری:** برگشت پذیری یا انعطاف پذیری، احتمال بازگشت سیستم به حالت مطلوب پس از یک شکست را گویند. از آنجایی که سیستم های منابع مختلف، از جمله منابع غذا دارای حالت عدم قطعیت هستند، برای یک سیستم منابع غذای مشخص، برگشت پذیری برابر است با تعداد گام های زمانی که در طول دوره شبیه سازی سیستم از یک عدم تأمین نیاز به حالت تأمین نیاز غذایی بر می گردد؛ تقسیم بر کل گام هایی که در آن سیستم دچار کمبود است. این مفهوم در مورد منابع غذا حالت صفر و یکی ندارد و حتماً باید با مفاهیم فازی تفهیم شود. یعنی نمی توان گفت سیستم در تأمین منابع غذا کاملاً شکست خورده یا پیروز شده است؛ پس حتماً با توجه به مفهوم عضویت فازی برای پایداری کمتر از ۱۰۰ درصد و تابع عرضه- تقاضا برای پایداری بیشتر از ۱۰۰ درصد عدم قطعیت را در نظر گرفت. رابطه آن به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\text{Res}^j = \begin{cases} 100 + \left| \frac{\sum_t (\mu^j(x_t) - \mu^j(x_{t-1})) \mu^j(x_t) > \mu^j(x_{t-1})}{\sum_t (1 - \mu^j(x_t))} \right| \times 100 \\ \text{if } \left| \frac{\sum_t (\mu^j(x_t) - \mu^j(x_{t-1})) \mu^j(x_t) > \mu^j(x_{t-1})}{\sum_t (1 - \mu^j(x_t))} \right| < 0 \\ \left| \frac{\sum_t (\mu^j(x_t) - \mu^j(x_{t-1})) \mu^j(x_t) > \mu^j(x_{t-1})}{\sum_t (1 - \mu^j(x_t))} \right| \times 100 \\ \text{if } \left| \frac{\sum_t (\mu^j(x_t) - \mu^j(x_{t-1})) \mu^j(x_t) > \mu^j(x_{t-1})}{\sum_t (1 - \mu^j(x_t))} \right| \geq 0 \end{cases} \quad (20)$$

قدر مطلق بدین منظور اعمال می شود که مفهوم انعطاف پذیری بیشتر از ۱۰۰ درصد قابل محاسبه باشد. البته باز هم ذکر این نکته ضروری است که مفهوم صادرات و واردات برای محصولات به صورت تکی و با شرایطی قابل بیان است و به صورت عمومی رابطه ای بین عدد درصد پایداری و میزان صادرات و واردات آب مجازی نمی توان ارائه کرد. برای هر محصول به صورت جداگانه می توان با پیدا کردن مقدار a مناسب در تابع تغییراتی در میزان درصد پایداری اعمال نمود. یعنی با ارائه a مناسب برای هر محصول در شهرستان های مختلف انعطاف پذیری هر محصول کشاورزی را مشخص کرد.

د) **آسیب پذیری:** این مفهوم میزان کمبودها در یک سیستم را مشخص می کند و نشان دهنده شدت شکست ها در یک سیستم است و می تواند به عنوان میانگین شکست ها و احتمال بیشتر شدن کمبود در یک یا چند دوره از یک حد معین را نشان دهد. در تعریف اول نسبت کل کمبودها به تعداد گام هایی که در آن ها کمبود اتفاق افتاده تقسیم بر کل

میزان تقاضای کاربر که در یک دوره شبیه سازی وجود داشته است؛ تعریف می شود. میانگین کمبود کل دوره ها مقایسه می شود. میانگین روی نامطلوبیت ها همان شکست پذیری سیستم است. پس میانگین شکست سیستم محاسبه می شود. اگر آسیب پذیری منفی شد، یعنی علاوه بر این که سیستم شکست نداشته است بلکه شکست های سیستم های دیگر را هم جبران کرده است. در مورد پایداری سیستم غذا بر مبنای عرضه و تقاضا، ممکن است عدد آسیب پذیری عددی منفی لحاظ شود. منفی شدن این معیار به معنی است که در سیستم حتماً واردات یا صادرات یا همان تجارت آب مجازی رخ داده است. رابطه آسیب پذیری نیز به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{Vul}^j = \max_t (1 - \mu^j(x_t)) \quad \forall t \quad (21)$$

$$= 1, 2, \dots, T$$

۲-۳-۴- پایداری سیستم انرژی

روابط پایداری در بخش انرژی با توجه به مفاهیم مطرح شده در بخش های قبلی و واقعیت موجود در محدوده مطالعاتی بر مبنای مفاهیم عرضه و تقاضا باز تعریف شده اند. مفاهیمی که در این قسمت در نظر گرفته شده اند شامل مفهوم قابلیت اطمینان پذیری بر پایه زمان و حجم و همچنین معیار عملکرد آسیب پذیری سیستم انرژی می باشند. در واقع در مورد انرژی طرح مفهوم انعطاف پذیری سیستم مفهوم خاصی را نمی رساند؛ چرا که شکست به آن معنایی قسمت های قبل معنا ندارد و سیستم به طریقی نیاز انرژی خود را تأمین خواهد کرد. در این بخش انرژی مربوط به استحصال آب زیرزمینی از چاه های کشاورزی مدنظر قرار گرفته است. عمده چاه های کشاورزی مورد استفاده در منطقه به دو بخش موتورهای دیزلی و موتورهای الکتریکی تقسیم بندی شده اند. طبق آمار برداری سازمان آب منطقه ای در سال ۱۳۸۹-۱۳۹۰ درصد چاه های دیزلی برای مناطق مختلف محدوده لنجان قابل تفکیک است. قسمتی از این انرژی برای استحصال آب زیرزمینی به کمک سوخت های فسیلی و استفاده از موتورهای دیزلی که کارکردی مکانیکی دارند تأمین می شود؛ و مابقی از طریق شبکه و به هنگام نیاز کشاورز مورد استفاده قرار می گیرد.

در واقع می توان گفت کشاورز هر موقع که نیاز به برق داشته باشد آن را از شبکه یا موتورهای دیزلی تأمین می کند. پس مفهوم صادرات و واردات در این بخش بسیار کمرنگ تر است ولی اگر این مفهوم در پژوهشی قرار باشد محاسبه شود از رابطه ۲۳ استفاده می شود. انرژی الکتریکی را نمی توان ذخیره کرد و پس از تولید یا باید صادر شود یا باید به مصرف برسد؛ فرض می شود که شبکه خورشیدی برای کل سال تولید انرژی انجام دهد. یعنی زمانی که در دوره رشد گیاه نیز

نیست؛ تولید برق انجام شود و مقادیر اضافه به شبکه برق تزریق شود. باتوجه به رابطه زیر رابطه شدت انرژی برای استحصال آب زیرزمینی محاسبه شده است (King-Okumu, 2019):

$$\text{Energy Intensity} \left(\frac{kWh}{m^3} \right) = \frac{mgh}{3600 \times 1000 \times \eta_{pomp}} \quad (22)$$

در رابطه بالا جرم مخصوص آب $1000 \frac{kg}{m^3}$ ، $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$ ارتفاع پیزومتری آبخوان و η_{pomp} راندمان پمپ می‌باشد.

پس از محاسبه این اعداد به کمک میزان آب تأمین شده برای آبیاری محصولات مختلف کشاورزی که از خروجی نرم افزار WEAP حاصل شده است؛ می‌توان انرژی مصرفی برای استحصال آب زیرزمینی برای محصولات مختلف و شهرستان‌های مختلف حوضه مطالعاتی را استخراج نمود.

$$EC(\text{Energy Consumption}) = \text{Energy Intensity}_i \times \text{Water Supply}_{i,j} \times \text{GW Percent Use Fraction} \quad (23)$$

در رابطه (23) Energy Intensity همان شدت انرژی محاسبه شده از رابطه (22) می‌باشد. $\text{Water Supply}_{i,j}$ آب تأمین شده آبیاری برای هر محصول حاصل از خروجی WEAP بوده و عبارت آخر درصد مورد استفاده برای آب زیرزمینی می‌باشد. پس از محاسبه این اعداد، انرژی مصرفی آن مقداری که بین سال‌های مختلف حداکثر بوده است به عنوان تقاضای انرژی در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر به جهت تأمین انرژی مورد نیاز برای استحصال آب زیرزمینی بر اساس درصد سهم چاه‌های دیزلی و چاه‌های برقی تعیین شده است.

تعریف عرضه و تقاضا در بخش انرژی با کمی تفاوت نسبت به دو بخش دیگر همراه است. تأمین بر اساس گزارشات آماربرداری آب منطقه‌ای برای چاه‌های دیزلی و الکتریکی و بر اساس اینکه چند درصد از چاه‌ها دیزلی و چند درصد از چاه‌ها الکتریکی بوده‌اند محاسبه شده است. در واقع به دلیل کمبود اطلاعات چنین فرضی در نظر گرفته شده است. تأمین انرژی از ضرب درصدی از موتورهای دیزلی که برای هر محصول کشاورزی خاص استفاده شده و انرژی مصرفی و میزان انرژی مورد نیاز آن به عنوان حداکثر انرژی‌های مصرفی در نظر گرفته شده‌اند.

$$\text{Demand}_j^{\text{Energy}} = \max\{EC^1, EC^2, \dots, EC^n\} \quad (24)$$

$$\text{Supply}_j^{\text{Energy}} = \alpha_j \times EC_j \quad (25)$$

که در رابطه (25) α_j درصد تأمین از موتورهای دیزلی برای یک محصول خاص می‌باشد و انرژی مصرفی هم که در رابطه (24) محاسبه می‌شود. باید توجه داشت از آنجا که تأمین انرژی در مورد انرژی مصرف لحظه‌ای دارد و قابل ذخیره‌سازی نیست؛ کاربر یا کشاورز

هر زمان که نیاز به انرژی داشته باشد از آن استفاده می‌کند و در نتیجه تأمین بر اساس نیازش محاسبه می‌شود. خود نیاز هم برابر حداکثر مقدار مورد استفاده برای سال‌های مختلف فرض شده است.

۲-۳-۵- پایداری ترکیبی

فرض بر این است که در بخش کشاورزی بر اساس سرانه مصرف و تولید (روابط انعطاف‌پذیری، اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری)، در بخش انرژی با در نظر گرفتن تولید انرژی خورشیدی و میزان اثری که می‌تواند تولید در سطح وسیع آن در سیستم بگذارد و همچنین روابط پایداری منابع آب (روابط انعطاف‌پذیری، اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری) عمل می‌شود (Karan and Asadi, 2018). با توجه به شرایط تغییر اقلیم می‌توان نشان داد که پایداری در سیستم‌های منابع آب می‌تواند منجر به پایداری در بخش غذا و انرژی شود. در این نوع پایداری باید توجه شود که کدام زیربخش از کدام یک از بخش‌های اصلی آب-انرژی-غذا به عنوان منبع تأمین‌کننده در نظر گرفته می‌شوند. چون پژوهش برای یک دوره تاریخی انجام شده است؛ خودبه‌خود برای شرایط آب و هوایی خشک و نرمال در نظر گرفته می‌شود.

مفهومی که در مورد پایداری تا به حال در نظر گرفته نشده است، مفهوم پایداری بیشتر از ۱۰۰ درصد می‌باشد. یعنی زمانی که سیستم تمامی میزان مصرف مورد نیاز خود را، خود تأمین کرده باشد بدون اینکه نیازی به استفاده از منابع خارجی در بخش‌های مختلف داشته باشد. در محدوده حوضه آبریز زاینده‌رود این اتفاق تا به امروز رخ نداده است. برای پایداری غذا از بین شاخص‌های پایداری عملکردی سیستم شاخص قابلیت اطمینان در زمان، حجم، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری قابل محاسبه است. برای طراحی یک سیستم پایدار هم‌بست آب-انرژی-غذا نیاز به مصالحه بین سمت عرضه و سمت تقاضای سیستم آب، انرژی و غذا می‌باشد. تنها متغیر تصمیمی که می‌تواند تعیین‌کننده پایداری ۱۰۰ یا بیشتر سیستم غذا و انرژی باشد تعیین اندازه سیستم مورد بررسی است.

همان‌گونه که از شکل ۲ مشخص است در این تحقیق و با توجه به واقعیت موجود در منطقه روابط پایداری داخلی بین سه بخش آب، انرژی و غذا به صورتی تعیین می‌شوند که علاوه بر این که برای هر منبع آب، انرژی و غذا به صورت مجزا محاسبه می‌شود، به صورت ترکیبی نیز محاسبه خواهد شد. در واقع برای محاسبه ترکیبی شاخص باید در نظر داشت کدام بخش به عنوان مصرف‌کننده دیگر منابع در نظر

۲-۳-۷- وزن دهی به شاخص‌ها

در این پژوهش وزن دهی به شاخص‌ها به کمک دو روش BWM و CRITIC انجام شده است. روش BWM یکی از روش‌های مبتنی بر مقایسه زوجی است. همچنین روش CRITIC مبتنی بر ماتریس تصمیم ورودی است (Diakoulaki, 1995).

روش بهترین-بدترین در سال ۲۰۱۵ توسط جعفر رضایی معرفی شد (Rezaei, 2015). این روش بر مبنای مقایسات زوجی و با الهام گرفتن از روش AHP ابداع شده است. همان‌طور که از اسم آن مشخص است، در این روش اساس کار انتخاب بهترین (پراهمیت‌ترین) و بدترین (کم‌اهمیت‌ترین) معیار یا گزینه است. فرض شود ماتریس تصمیمی با n معیار مدنظر باشد در این ماتریس باید مقایسه زوجی بین معیارها انجام شود و میزان اهمیت نسبی هر یک از شاخص‌ها نسبت به یکدیگر مورد ارزیابی قرار بگیرد. از جدول مقایسات زوجی روش AHP، اهمیت برابر دو معیار نسبت به هم یعنی برابری دو شاخص و اهمیت نسبی ۹ برابر یعنی معیار اول در مقایسه با معیار دوم ۹ برابر اهمیت بیشتری دارد. از مفاهیم مطرح‌شده در روش AHP می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

(الف) اصل سازگاری مقایسات زوجی؛

(ب) اصل معکوس‌پذیری ماتریس تصمیم

در بحث مقایسات زوجی تصمیم‌گیرنده دو مورد را می‌تواند مدنظر قرار دهد. جهت و شدت ارجحیت یک معیار بر معیار دیگر قابل اعمال است. در اکثریت موارد تصمیم‌گیرنده می‌تواند جهت اعمال ارجحیت را مشخص کند، اما چالش اصلی میزان شدت ارجحیت و برتری یک معیار بر معیار دیگر است. این شدت و ضعف است که باعث ایجاد ناسازگاری در مقایسات زوجی می‌شود. روش BWM با تکیه بر همین مفهوم شدت و ضعف مفاهیم جدیدتر و کاراتری ارائه می‌دهد. گام‌های الگوریتم محاسباتی به شرح زیر است:

گام ۱) مشخص کردن مجموعه‌ای از معیارها (شاخص‌ها) برای مسأله مورد بررسی؛

گام ۲) مشخص کردن بهترین (پراهمیت‌ترین) و بدترین (کم‌اهمیت‌ترین) معیار؛ در این مرحله تصمیم‌گیرنده بهترین و بدترین معیار را در حالت عمومی مشخص می‌کند. در این مرحله هنوز مقایسه‌ای بین معیارها انجام نشده است؛

گام ۳) تعیین ارجحیت بهترین معیار نسبت به بقیه شاخص‌ها از بین اعداد ۱ تا ۹. بردار بهترین-نسبت به بقیه مشخص شده به شرح زیر می‌باشد:

گرفته می‌شود. با توجه به دیاگرام رسم‌شده، غذا به عنوان مصرف کننده منابع آب و انرژی است و باید شاخص پایداری ترکیبی برای آن محاسبه شود.

الف) غذا: با توجه به دو نکته: محاسبه شاخص‌های پایداری برای هر یک از محصولات کشاورزی به صورت جداگانه. دوماً محاسبه شاخص‌های پایداری با توجه به این موضوع که مصرف‌کننده انرژی و آب است. ب) آب: محاسبه شاخص پایداری منابع مختلف آب، همچون آبیاری، صنعتی، شرب و غیره، ج) انرژی: محاسبه پایداری مرتبط به انرژی قبل و بعد از استفاده از پیل‌های خورشیدی.

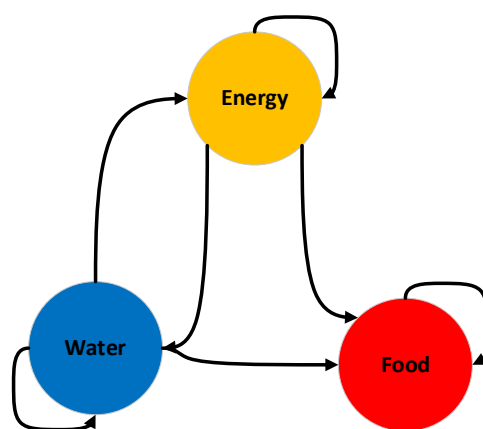


Fig. 2- Interactions among resources from consumer and supplier viewpoint

شکل ۲- رابطه بین منابع از دید مصرف‌کننده و تأمین‌کننده‌گی

پایداری ترکیبی به صورت میانگین هندسی پایداری آب، غذا و انرژی در نظر گرفته شده است:

$$SI_{Nexus}^j = \left[SI_{Food}^j \times SI_{Water}^j \times SI_{Energy}^j \right]^{\frac{1}{3}} \quad (26)$$

۲-۳-۶- شاخص انتشار کربن دی‌اکسید

شاخص انتشار کربن دی‌اکسید، به عنوان یک هزینه زیست‌محیطی و از منظر انتشار کربن دی‌اکسید به وسیله پمپ‌های دیزلی و نیروگاه‌های سوخت حرارتی و بخاری در نظر گرفته می‌شوند. برای محاسبه این شاخص به طریق زیر عمل می‌شود:

$$CO_2 \text{ Emission} = GW_I \times GW_V \times CO_{2I} \times \alpha_{GW} \quad (27)$$

در رابطه بالا α_{GW} درصد تأمین آب از آب‌های زیرزمینی از پارامترهای کالیبره‌شده در WEAP، $\frac{\text{tonCO}_2}{\text{kWh}}$ ضریبی است که نشان می‌دهد برای تولید یک تن کربن دی‌اکسید چقدر انرژی مصرف می‌شود GW_I میزان تأمین آب از آبیاری است؛ $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$ ضریب قابل محاسبه از شدت انرژی می‌باشد.

همانند روش AHP در این روش نیز باید به محاسبه نرخ ناسازگاری‌ها و مفاهیم دیگری که تعریف شده است پرداخت تا بهتر بتوان نتایج را مورد ارزیابی قرار داد. سنجه نرخ ناسازگاری برای تعیین میزان معتبر بودن جواب‌ها استفاده می‌شود:

نرخ سازگاری: (ناسازگاری اصلی یا بر مبنای خروجی‌های مدل) تعریف سازگاری کامل: ماتریس به صورت کامل سازگار است اگر برای تمام زها رابطه (۳۶) برقرار باشد:

$$a_{Bj} \times a_{jW} = a_{BW} \quad (36)$$

که در رابطه (۳۶) a_{BW} به معنی ارجحیت بهترین معیار نسبت به بدترین معیار می‌باشد. با کمی توجه فلسفه تعریف سازگاری کامل این گونه مشخص می‌شود که اگر رابطه (۳۶) برای همه معیارها برقرار باشد سازگاری کامل وجود دارد ولی اگر نباشد ماتریس دارای مقداری ناسازگاری است. هرچند هیچ موقع نمی‌توان به سازگاری کامل رسید؛ به همین جهت نرخ ناسازگاری محاسبه می‌شود. ناسازگاری زمانی برقرار است که سمت چپ معادله بالا بیشتر یا کمتر از سمت راست آن باشد. واضح است که بیشترین نابرابری زمانی ایجاد می‌شود که a_{Bj}, a_{jW} حداکثر مقدار را دارا باشند که منجر به محاسبه ξ خواهد شد:

$$\frac{w_B}{w_j} \times \frac{w_j}{w_W} = \frac{w_B}{w_W} \quad (37)$$

در واقع ξ مقداری است که باید از مقادیر سمت چپ معادله (۳۸) کاسته شده و به مقدار سمت راست افزوده شود:

$$(a_{Bj} - \xi) \times (a_{jW} - \xi) = (a_{BW} + \xi) \quad (38)$$

برای کمترین میزان سازگاری ($a_{Bj} = a_{jW} = a_{BW}$) برقرار است:

$$\xi^2 - (1 + 2a_{BW})\xi + (a_{BW}^2 - a_{BW}) = 0 \quad (39)$$

حل معادله درجه دوم (۳۹) برای مقادیر مختلف مجموعه $a_{BW} \in \{1, 2, \dots, 9\}$ منجر به جدول ۱ و مقادیر متفاوت ξ خواهد شد.

در نهایت نرخ سازگاری نهایی به صورت زیر مشخص خواهد شد:

$$\text{Consistency Ratio}^{\text{Output}} = \frac{\xi^*}{\xi^*} \quad \text{CR}^0 \in [0, 1] \quad (40)$$

هرچه نرخ ناسازگاری به صفر نزدیک‌تر باشد، قضاوت‌های انجام‌شده سازگارتر هستند. مقدار صفر به معنی سازگاری کامل قضاوت‌هاست. رویکرد جدید محاسبه‌ی نرخ سازگاری (بر مبنای ورودی‌ها):

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}) \quad (28)$$

که a_{Bj} نشان‌دهنده ارجحیت بهترین معیار B نسبت به بقیه معیارها می‌باشد. واضح است که $a_{BB} = 1$.

گام ۴) تعیین ارجحیت سایر معیارها نسبت به بدترین معیار (شاخص) با استفاده از اعداد بین ۱ تا ۹. بردار بقیه معیارها نسبت به بدترین معیار به شرح زیر است:

$$A_w = (a_{1w}, a_{2w}, \dots, a_{nw})^T \quad (29)$$

که در آن a_{jw} نشانگر ارجحیت سایر معیارها نسبت به بدترین معیار می‌باشد. واضح است که $a_{ww} = 1$.

گام ۵) محاسبه وزن‌های بهینه: ($w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*$) به جهت محاسبه $a_{Bj} = \frac{w_B}{w_j}$ و $a_{jW} = \frac{w_j}{w_W}$ باید به دنبال راه‌حلی بود که قدر مطلق حداکثر اختلاف زیر را کمینه کند:

$$\min \max \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \quad (30)$$

محدودیت مسأله به صورت زیر است:

$$\text{s. t.} \quad (31)$$

$$\sum_j w_j = 1, w_j \geq 0$$

مسأله بالا به صورت زیر نیز قابل بیان است:

$$\min \xi \quad (32)$$

s. t.

$$\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \xi \quad \forall j \quad (33)$$

$$\sum_j w_j = 1, w_j \geq 0, \quad \forall j \quad (34)$$

از حل مسأله بهینه‌سازی بالا مقادیر ξ و وزن معیارها بدست می‌آید (Rezaei, 2015).

ذکر این نکته ضروری است که از این روش می‌توان برای رتبه‌بندی گزینه‌ها همچون روش AHP نیز استفاده نمود؛ در این پژوهش از این روش فقط برای مشخص نمودن وزن هر یک از شاخص‌ها استفاده شده است.

Table 1- Inconsistency ratios of BWM method

جدول ۱- مقادیر نرخ ناسازگاری روش BWM									
a_{BW}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Consistency Ratio	0	0.44	1.00	1.63	2.30	3.00	3.73	4.47	5.23

دست و بالادست سد زاینده رود و تأثیری که دیگر گره‌های نیاز بر روی تخصیص این محدوده مطالعاتی دارند اشاره کرد. در گام ۲، مدل‌سازی بارش-رواناب زیرحوضه لنجانان بر مبنای روش محتوای رطوبتی خاک است. برای هر محدوده مطالعاتی مبارکه، لنجان و دهقان که در این زیرحوضه قرار می‌گیرند، یک محدوده آبریز در محیط نرم‌افزار توسعه داده و مدل‌سازی شده است. این روش از ورودی‌های متنوعی استفاده می‌کند که شامل نوار ابزارهای اقلیم، کاربری اراضی، آبیاری و برداشت محصولات کشاورزی است. در نوار ابزار اقلیمی این مدل، با توجه به شکل ۳ پارامترهای اقلیمی بارش، دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و تبخیر و تعرق گیاه مرجع همگی به صورت ماهیانه و برای دوره مطالعاتی ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۳ وارد شده‌اند.

براساس نظر خبرگان حوضه، سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۶ به عنوان سال نرمال، سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰ سال‌های خشک و سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۳ سال‌های نسبتاً نرمال در نظر گرفته می‌شوند. در نوار ابزار کاربری زمین، سطح زیر کشت بر اساس گزارشات سازمان جهاد کشاورزی و برای تفکیک محدوده مطالعاتی از نقشه تفکیکی زیرحوضه و شهرستان‌ها و تطبیق این دو به کمک دستور Intersect استفاده شده است. از DEM ۹۰ متری به جهت تعیین مرتفع‌ترین و پست‌ترین نقطه استفاده شده است. ضریب گیاهان یا همان K_c نیز بر اساس گزارشات جهاد کشاورزی به مدل ارائه شده است. برای ضریب مقاومت رواناب، در ابتدا از ضریب پیشنهادی نرم‌افزار به صورت پیش‌فرض استفاده شد؛ اما با توجه به تحلیل روند سناریوها دستخوش تغییر شده و در نهایت برای محدوده‌های مختلف کالیبره شده است. ضریب مقاومت رواناب در واقع پارامتری است که در روش محتوای رطوبتی خاک به جهت تعیین میزان مقاومت برای به وجود آمدن رواناب را تصحیح می‌کند. در گام ۳ که به عنوان نوار ابزار آبیاری در مدل شناخته می‌شود؛ باید گزینه آبیاری شده برای محصولات کشاورزی تعریف شده انتخاب شود و حد پایین و بالای آبیاری برای هر محصول وارد شود. حد پایین و بالای آبیاری نیز از مواردی است که بر اساس سناریوهای تعریف شده قابل تغییر است. در گام ۴، میزان برداشت محصولات کشاورزی در این روش مشخص می‌شود. در نوار ابزار مربوطه در نرم‌افزار، میزان پتانسیل فعلی تولید محصولات کشاورزی اصلی در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۳ برای سه شهرستان وارد شده است. ضریب K_p به صورت پیش‌فرض در نظر گرفته شده و در طول کالیبراسیون تغییر چندانی نداشته است. گام ۵ پس از شبیه‌سازی منابع آب و غذا انجام می‌شود که در آن محاسبه سرانه محصولات کشاورزی بر اساس نیاز مصرف انسان و دام بوده که توضیحات آن در فصول قبل ارائه شد.

رویکرد اصلی محاسبه نرخ ناسازگاری مبنی بر داده‌های خروجی زمانی قابل انجام است که همه روندهای محاسباتی روش BMW انجام شده باشند؛ ولی گاهی اوقات لازم است که ناسازگاری قضاوت‌های تصمیم‌گیرنده در شروع قضاوت‌های ایشان مشخص شود تا تصمیم‌گیرنده بتواند تصمیم‌گیری بهتر و دقیق‌تری انجام دهد. روش جدید ساده و از لحاظ محاسباتی راحت‌تر است. این روش بر اساس قضاوت‌های ورودی که تصمیم‌گیرنده یا خبره اعمال می‌کند، محاسبه می‌شود. نرخ سازگاری ورودی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$CR^I = \max_j CR_j^I \quad (41)$$

که در آن نرخ سازگاری ورودی به صورت زیر حساب می‌شود:

$$CR^I = \begin{cases} \frac{|a_{Bj} \times a_{jW} - a_{BW}|}{a_{BW} \times a_{BW} - a_{BW}} & \text{if } a_{BW} > 1 \\ 0 & \text{if } a_{BW} = 1 \end{cases} \quad (42)$$

چند مورد از مزیت‌های استفاده از روش مذکور نسبت به روش اصلی به شرح زیر می‌باشند:

- ۱) سریعاً بازخورد قضاوت‌ها را مشخص می‌کند؛ چون نیازی به انجام تمام مراحل روش BMW نیست. روش اصلی بر مبنای وزن‌های خروجی مدل هستند که کمی سازگاری قضاوت‌ها دچار چالش بیشتری می‌شود.
- ۲) تفسیر آن راحت‌تر است؛ حداکثر اختلاف نرمال شده بین a_{BW} و قضاوت‌های همان معیار است.
- ۳) می‌تواند به عنوان یک راهنمای مشخص به تصمیم‌گیرنده کمک کند که قضاوت‌های دقیق‌تری انجام دهد. روش اصلی میزان سازگاری تصمیم‌گیرنده را مشخص می‌کند اما نمی‌تواند کمکی به تصحیح ناسازگاری‌ها بکند (Liang F et al., 2019).
- ۴) وابسته به مدل نیست. در فرم‌های مختلف روش BMW از خطی تا غیرخطی تا گروهی قابل پیاده‌سازی است.

۲-۳-۸- توسعه مدل مفهومی

شکل ۳، چارچوب پژوهش را با جزئیات آن در نه گام مختلف ارائه می‌دهد. با توجه به این شکل، براساس گام اول، شبیه‌سازی منابع حوضه آبریز لنجانان انجام می‌شود که از مدل جامع منابع آب زاینده رود، توسعه داده شده توسط گل محمدی استفاده شده است (Safavi and Golmohammadi, 2015). بنابراین دوره شبیه‌سازی مدل اصلی، از سال ۱۹۹۱ تا سال ۲۰۱۴ و با گام‌های زمانی ماهانه است. از دلایل استفاده از این مدل به جای یک مدل زیرحوضه‌ای در زیرحوضه لنجانان می‌توان به جامعیت کاربرد این مدل در مدل‌سازی کل حوضه زاینده رود و لحاظ کردن تأثیرات مختلف در حوضه اعم از وضعیت بالادست و سد بر این زیرحوضه، وضعیت برداشت‌های آب در پایین

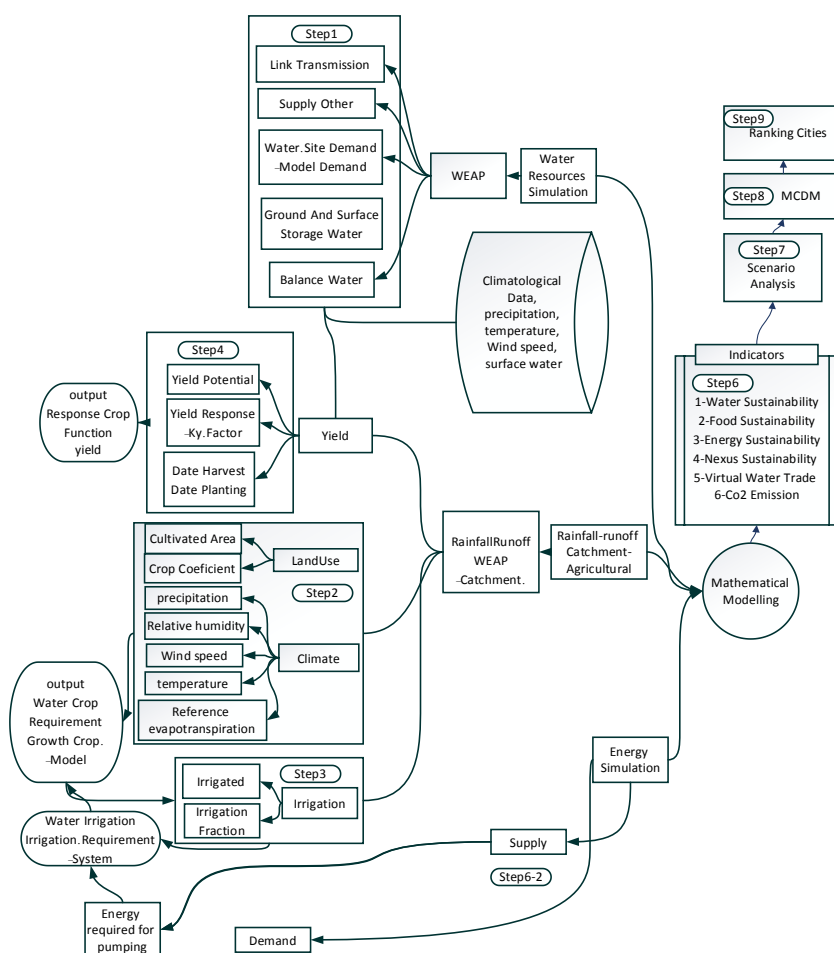


Fig. 3- Conceptual framework

شکل ۳- مدل مفهومی پژوهش

سناریوی ترکیبی دوم و سوم، سناریوی ترکیبی افزایش راندمان پمپها و سناریوی سوم و در نهایت سناریوی ترکیبی اول، دوم و سوم هستند. در گام ۸ روشهای مختلف تصمیمگیری انتخاب شدهاند. روشهای وزن دهی خود به دو دسته روشهای بدون اخذ نظرات تصمیم گیرنده و با اخذ نظرات تصمیم گیرنده دسته بندی می شوند. و در نهایت گام ۹ با تجمیع روشهای تصمیم گیری و استراتژیهای اولویت بندی فوق، رده بندی سناریوها برای هر شهرستان انجام شده است.

۳- مطالعه موردی

حوضه آبریز زاینده رود یکی از زیرحوضه های مهم در فلات مرکزی ایران است و حوضه آبریز زاینده رود جزیی از حوضه آبریز فلات مرکزی می باشد. حوضه آبریز گاوخونی دارای ۲۱ زیرحوضه و محدوده مطالعاتی می باشد. حوضه آبریز گاوخونی از نظر بررسی آبهای زیرزمینی به ۱۶ زیرحوضه تقسیم می شود، حدود مطالعاتی لنجانات در ناحیه میانی حوضه آبریز زاینده رود است. این زیرحوضه شامل یک دشت

در گام ۶ به محاسبه شاخص های مختلف در نظر گرفته شده پرداخته می شود. در گام ۶-الف، محاسبه شاخص های پایداری منابع آب، منابع غذا، منابع انرژی و پایداری ترکیبی انجام می شود. در محاسبه شاخص پایداری منابع آب و غذا از سه معیار عملکردی، و در محاسبه شاخص پایداری منابع انرژی از دو معیار عملکردی استفاده شده است. گام ۶-ب به محاسبه میزان انرژی مورد نیاز برای استحصال آب زیرزمینی بر مبنای مقادیر شبیه سازی شده از نرم افزار می پردازد. این قسمت با رویکرد و عرضه و تقاضای انرژی و با فرض اینکه درصدی از سوخت های دیزلی و درصدی از شبکه برق سراسری تأمین شود، در نظر گرفته شده است. گام ۶-ج به محاسبه تجارت آب مجازی بر اساس گام ۵ و انتشار گاز کربن دی اکسید بر اساس گام ۶-ب می پردازد. گام ۷ مرحله تدوین سناریوها بر اساس شاخص های در نظر گرفته شده است. سناریوها به ترتیب شامل سناریوی پایه، سناریوی اول (تغییر سطح زیرکشت)، سناریوی دوم (افزایش راندمان آبیاری)، سناریوی سوم (استفاده از ظرفیت پنل های خورشیدی)، سناریوی ترکیبی اول و دوم،

تن رسیده است.

شکل ۷، محتوای آب مجازی محصول برنج را حدود ۲۰۰۰ مترمکعب برتن نشان می‌دهد. از آنجا که این محصول جزء محصولات استراتژیک شهرستان لنجان است، مقدار آب مجازی آن تقریباً ثابت بوده و تغییری نکرده است و از سیاست‌های تولیدی محصولات کشاورزی حذف نشده است. محتوای آب مجازی آبی سهم بیشتری دارد و سهم عمده آن به نسبت محتوای آب سبز نشان داده شده است. شکل ۸ میزان انتشار کربن دی‌اکسید را نشان می‌دهد که برای این محصول نسبتاً کم است؛ چراکه بیشتر برق مصرفی از شبکه برق شهری بوده و کمتر از موتورهای دیزلی استفاده شده است.

همچنین نتایج براساس شکل ۹، نشان می‌دهد قسمت اعظمی از محتوای آب مجازی مرتبط با محتوای آب مجازی آبی است. در ادامه، شکل ۱۰، میزان گاز کربن دی‌اکسید تولیدشده به ازای برداشت آب از آبخوان را ارائه می‌دهد.

پس از اعمال فرضیات هشت سناریوی توسعه داده‌شده و با توجه به شش شاخص ارائه‌شده، ماتریس تصمیم‌نهایی در دو شهرستان مبارکه، لنجان تشکیل شد. اعداد این ماتریس هر کدام دارای واحد منحصر به فرد خود بوده و غیر از معیار یا شاخص انتشار کربن دی‌اکسید، بقیه معیارها به عنوان سود در نظر گرفته شده‌اند. این ماتریس برای دو شهرستان به صورت مجزا در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. این جداول در واقع نتایج اجرای مدل در سناریوهای مختلف تعریف‌شده و جمع‌بندی تمام آن‌ها را برای تمام منابع و محصولات زیرکشت باتوجه به معیارهای عملکرد محاسبه‌شده در هر بخش ارائه می‌دهد.

همان‌طور که از جدول ۲ مشخص است، حدود ۴۶۸ میلیون مترمکعب آب مجازی در صورت ادامه روند موجود به محدوده مورد مطالعه شهرستان مبارکه وارد خواهد شد. براساس ریزنتایج، این میزان واردات آب مجازی به این دلیل است که به غیر از محصولات اصلی مثل پیاز یا گندم، بخش اعظم محصولات مربوط به نیاز علوفه‌ای و دام از بیرون محدوده وارد شده‌اند و تولیدات به نسبت کمتری هم نسبت به دو محصول نام برده دارند، که بیلان بین واردات و صادرات به صورت واردات آب مجازی محاسبه شده است. باید متذکر شد میزان تولید محصولات نیاز دامی نسبت به تقاضایی که دام‌ها دارند، در محدوده مورد مطالعه بسیار کمتر از محصولی همچون پیاز بوده که تولید زیادی هم داشته است ولی تقاضای نسبتاً ثابتی در سالیان متمادی داشته است.

اصلی حاوی آبخوان آبرفتی بوده و تعداد پهنه‌های آبرفتی در حاشیه است که فاقد آبخوان مجزا می‌باشند. وسعت محدوده مطالعاتی 3381 km^2 است که $1724/4 \text{ km}^2$ آن را ارتفاعات و $1656/6 \text{ km}^2$ آن را دشت تشکیل می‌دهد. همچنین آبخوان آبرفتی $1446/3 \text{ km}^2$ از دشت را شامل می‌شود. بلندترین نقطه محدوده برابر با ۳۰۸۵ متر از سطح دریا در ارتفاعات جنوب باختری و کمترین آن برابر با ۱۶۴۰ متر از سطح دریا در شمال خاوری (حاشیه زاینده‌رود) واقع می‌باشد. محدوده لنجان‌ات از سه شهرستان اصلی لنجان، مبارکه و دهاقان تشکیل شده است. این سه شهرستان جمعیتی بالغ بر حدود ۴۵۰۰۰۰ نفر را دارا می‌باشند. صنایع مهمی مانند مجتمع فولاد مبارکه و ذوب‌آهن اصفهان در این زیر حوضه قرار دارند. این زیرحوضه از شمال شرقی به زیرحوضه نجف‌آباد، از شرق به زیرحوضه مهبیارشمالی و مهبیار جنوبی، از شمال غربی به زیرحوضه بن-سامان و از جنوب به شهرضا متصل است. زیرحوضه مذکور از اهمیت بالایی در حوضه گاوخونی برخوردار است و دلیل اهمیت آن وجود اندرکنش میان رودخانه و آبخوان است. حداکثر ارتفاع در این زیرحوضه با ارتفاعی برابر ۲۰۵۷ متر از سطح دریا در شمال غرب محدوده در مجاورت محدوده بن-سامان و حداقل ارتفاع در این زیرحوضه با ارتفاعی برابر ۱۸۶۰ متر از سطح دریا در غرب محدوده در مجاورت مجتمع فولاد مبارکه قرار دارد. رودخانه زاینده‌رود از جهت شمال غربی وارد محدوده لنجان‌ات می‌شود و پس از طی مسافتی حدوداً ۲۴ کیلومتری از مرز شرقی حوضه خارج می‌شود و وارد حوضه نجف‌آباد می‌شود. شکل ۴ موقعیت حوضه آبریز زاینده‌رود، زیرحوضه لنجان‌ات، رودخانه زاینده‌رود در حوضه گاوخونی، باتلاق گاوخونی و سد زاینده‌رود را نشان می‌دهد (Zayandab Consulting Co., 2010).

۴- نتایج و بحث

با توجه به شکل ۵ و محاسبات انجام‌شده و همچنین نتایج مدل WEAP، محتوای آب مجازی پیاز در مقایسه با یونجه در سال‌های ابتدایی شبیه‌سازی کمتر است. به صورت کلی نیاز آبی پیاز مقدار بیشتری است، و در سال‌های پایانی شبیه‌سازی پایین بودن سطح زیر کشت آن با توجه به اینکه عملکرد آن تقریباً در طی سالیان شبیه‌سازی تقریباً ثابت بوده است؛ منجر به افزایش محتوای آب مجازی آن نسبت به محصولی همچون یونجه شده است.

شکل ۶ میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید برای محصول پیاز و در مقایسه با یونجه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در سال‌های آخر شبیه‌سازی که تولید پیاز رو به کاهش بوده است، میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید نیز به میزان چشم‌گیری کاهش یافته و به حدود ۱۰۰

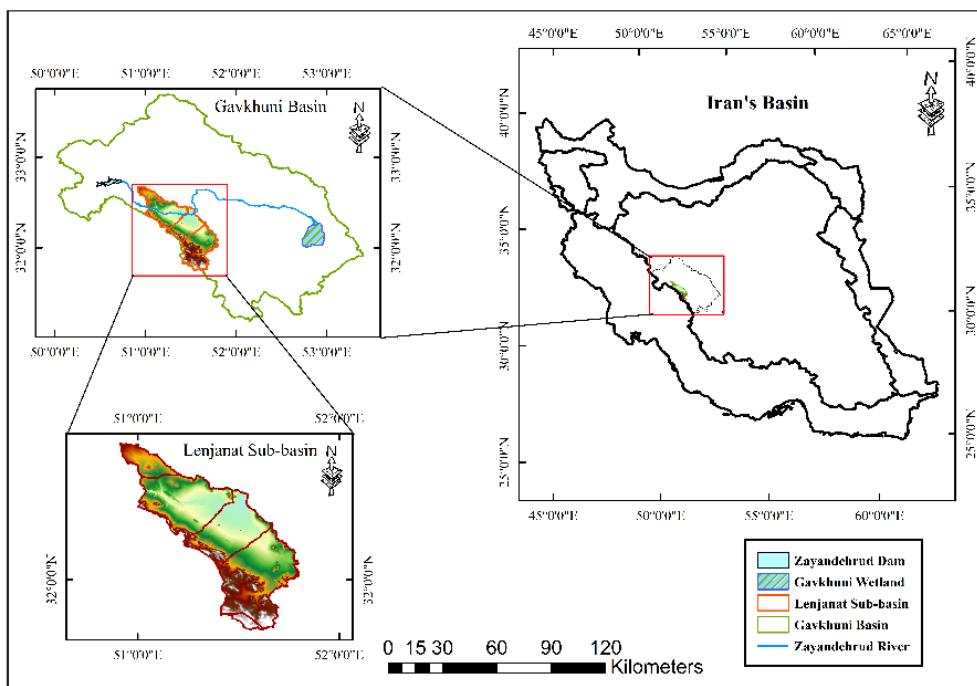


Fig. 4- Location of Lenjanat sub-basin
 شکل ۴- موقعیت زیرحوضه لنجانان

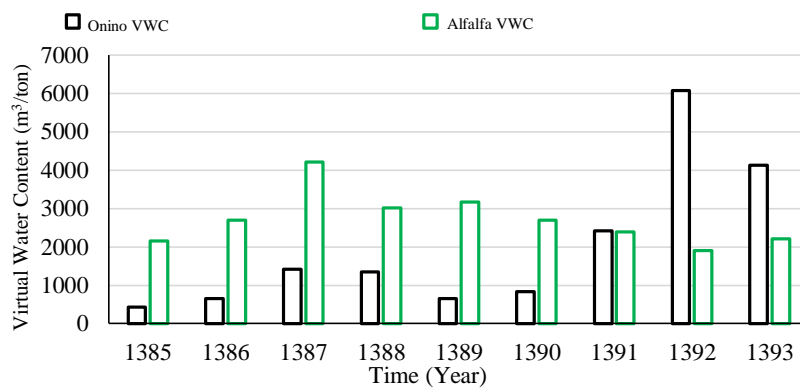


Fig. 5- Virtual water content of onion in Mobarekeh
 شکل ۵- محتوای آب مجازی پیاز و یونجه در شهرستان مبارکه

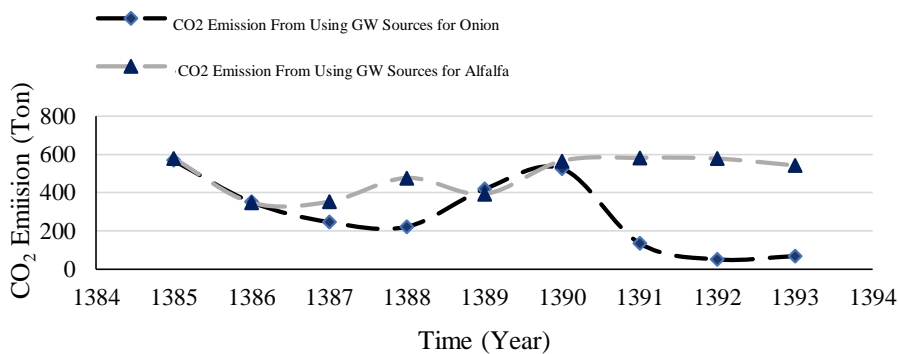


Fig. 6- CO₂ emission of producing onion from GW sources
 شکل ۶- میزان تولیدشده گاز کربن دی اکسید به ازای مصرف آب های زیرزمینی

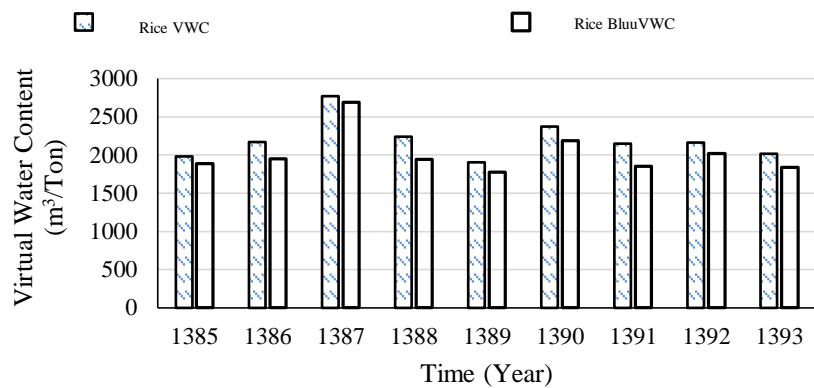


Fig. 7- Virtual water content of rice in Lenjan
 شکل ۷- محتوای آب مجازی برنج در شهرستان لنجان

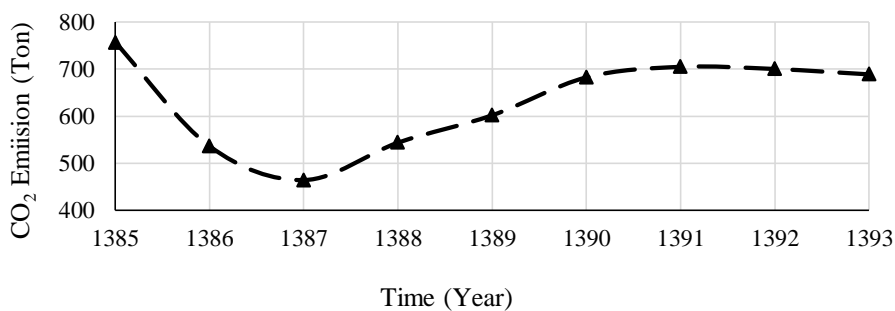


Fig. 8- CO₂ emission of producing rice from GW sources
 شکل ۸- میزان تولید شده گاز کربن دی اکسید به ازای مصرف آب های زیرزمینی

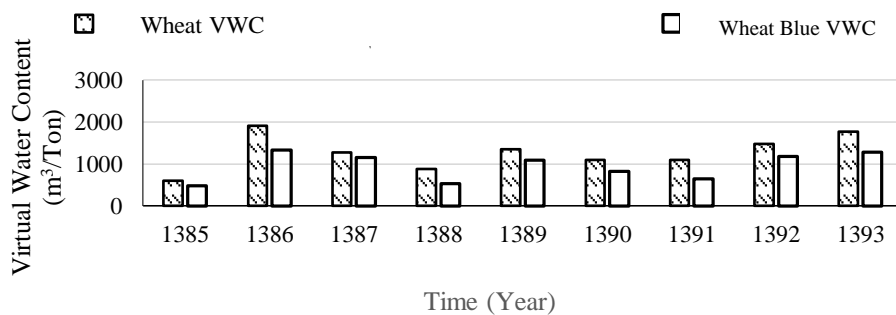


Fig. 9- Virtual water content of wheat in Dehaghan
 شکل ۹- محتوای آب مجازی گندم در شهرستان دهقان

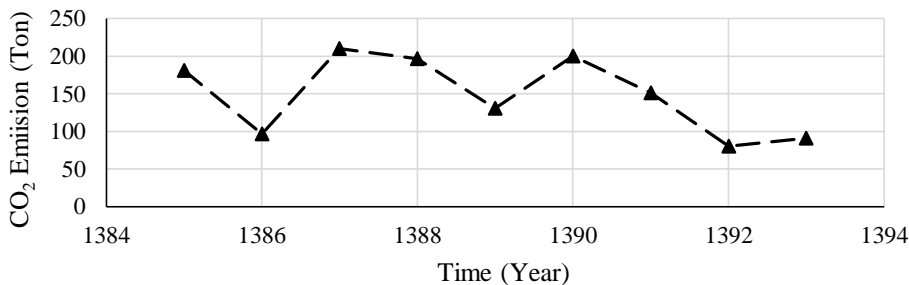


Fig. 10- CO₂ emission of producing wheat from GW sources
 شکل ۱۰- میزان گاز کربن دی اکسید تولید شده به ازای مصرف آب های زیرزمینی

Table 2- Decision matrix for eight scenarios and six indicators for Mobarakeh city

جدول ۲- ماتریس تصمیم برای هشت سناریو و شش معیار ارزیابی در شهرستان مبارکه

	Water Sustainability	Food Sustainability	Energy Sustainability	Nexus Sustainability	Co2 Emission	VWT
Scenario1: trend (business as usual)	58	172	16	54	20815	468
Scenario2: Crop pattern	73	212	62	69	52840	353
Scenario3: Increasing irrigation efficiency	82	189	8	48	28513	132
Scenario4: implementation of solar PV farms	59	172	62	86	4717	488
Scenario5: increasing pump efficiency	72	173	8	44	35545	577
Scenario6: combination of 3 and4	82	189	65	100	11126	132
Scenario7: combination of 4&5	72	170	66	93	5224	292
Scenario8: combination of 1&2&3	72	173	51	86	19405	577

با توجه به جدول ۳ پایداری منابع آب در شهرستان لنجان از لحاظ پایداری غذا با اینکه پایداری در اکثر سناریوها کمی بیشتر از ۱۰۰ درصد است اما این منطقه به عنوان واردکننده آب مجازی به میزان زیادی خواهد بود. افزایش واردات محصولات کشاورزی به بهبود امنیت غذایی کمک کرده است. در این محدوده محصول تعیین کننده برنج است که همین محصول باعث افزایش درصد پایداری غذا شده است. در سناریوی الگوی کشت که با کاهش سطح زیرکشت محصولی همچون برنج و افزایش سطح زیرکشت محصولات علوفه‌ای همراه بوده است، افزایش پایداری منابع غذایی به قیمت کاهش پایداری منابع آب و کاهش پایداری انرژی بوده است.

طبق سناریوی تغییر سطح کشت، با افزایش سطح زیرکشت محصولات دامی سعی شده است به سمت خودکفایی محصولات علوفه‌ای حرکت شود و این مهم با کاهش واردات آب مجازی نسبت به سناریوی پایه اتفاق افتاده است ولی در بقیه شاخص‌ها لزوماً بهتر عمل نکرده است. زیاد بودن مقدار نهایی پایداری غذا به دلیل زیاد بودن تولید محصول پياز و اثر وزن این محصول بر عدد پایداری است. همچنین همان‌طور که مشاهده می‌شود، ترکیب سناریوهای ۲ و ۳، به کاهش انتشار کربن دی‌اکسید کمک کرده است. در ادامه در جدول ۳، نتایج ماتریس تصمیم مربوط به شهرستان لنجان ارائه شده است.

Table 3- Decision matrix for eight scenarios and six indicators for Lenjan city

جدول ۳- ماتریس تصمیم برای هشت سناریو و شش معیار ارزیابی در شهرستان لنجان

	Water Sustainability	Food Sustainability	Energy Sustainability	Nexus Sustainability	Co2 Emission	VWT
Scenario1: trend (business as usual)	75	101	53	74	11795	1549
Scenario2: Crop pattern	79	158	27	70	8468	1208
Scenario3: Increasing irrigation efficiency	84	103	29	74	6680	1205
Scenario4: implementation of solar PV farms	73	106	71	82	9706	1593
Scenario5: increasing pump efficiency	82	101	54	76	11692	1219
Scenario6: combination of 3 and4	84	103	70	85	9004	1205
Scenario7: combination of 4&5	81	110	78	88	6172	1593
Scenario8: combination of 1&2&3	82	101	68	83	8393	1219

یادآوری می‌شود، یکی از اهداف این پژوهش با توجه به داده‌های موجود و قابل دسترس، جایگزینی میزان انرژی برقی که از شبکه سراسری تأمین می‌شود با سیستم پنل‌های خورشیدی بوده است. در واقع در سناریوهای پایه، اول و دوم فقط قسمتی از انرژی که از پمپ‌های دیزلی تأمین می‌شود در نظر گرفته شده و در سناریوهای دارای انرژی مقدار برقی که از شبکه تأمین می‌شده است از سیستم پنل خورشیدی جایگزین شده است. سناریوهایی که به صورت مجزا و یا ترکیبی از سیاست‌های انرژی جایگزین و افزایش راندمان در انرژی استفاده شده‌اند، برای بهبود عملکرد سیستم استفاده می‌شوند. علاوه بر این، عامل کنترل‌کننده دیگر برای تأمین نیروگاه‌های خورشیدی، عامل انتشار کربن دی‌اکسید بوده است. در واقع کاهش انتشار کربن دی‌اکسید نیز محدودیتی دارد و از مقداری بیشتر نمی‌تواند کاهش پیدا کند؛ که خود باعث کنترل درصد و میزان پایداری انرژی سناریوهای انرژی است. نتیجه دیگری که از خروجی‌های روش‌های تصمیم‌گیری می‌توان گرفت این است که سناریوی افزایش راندمان آبیاری به تنهایی عملکرد مطلوبی ندارد و در رده‌های آخر سناریوهای انتخابی قرار می‌گیرد؛ ولی هنگامی که با سناریوی استفاده از پنل خورشیدی ترکیب می‌شود؛ جزء سناریوهای برتر قرار می‌گیرد. علت آن با توجه به نتایج روش‌های BWM وزن شاخص‌ها و ارتباطاتی است که بین آنها بدست آمد.

سناریوهای مربوط به تغییر سطح زیرکشت، که مستقیماً بر روی آب مجازی تأثیر دارند جزء سناریوهای برتر رتبه‌بندی شده نیستند. این قضیه شاهد دیگری بر این است که برای محدوده مطالعاتی این تحقیق، آب مجازی به طور مستقیم پایداری سیستم‌های غذا را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. البته این مهم برای دیگر مناطق بررسی نشده است و نیاز به بررسی بیشتری دارد.

براساس پرسش‌نامه‌های تکمیل‌شده، کارشناسان و خبرگان در حوزه تخصصی مدیریت منابع آب، کشاورزی و انرژی، پایداری نکسوس را به عنوان بهترین (مهم‌ترین) شاخص و تجارت آب مجازی را به عنوان کم اهمیت‌ترین شاخص انتخاب نمودند. طبق این نظرات، وزن شاخص‌ها، نرخ ناسازگاری ورودی و خروجی طبق جدول ۴ و ۵ به دست آمد. همان‌گونه که از جدول ۴ مشخص است پایداری نکسوس از منظر متخصصین بیشترین وزن و شاخص تجارت آب مجازی با مقدار ۰/۰۶ دارای کمترین وزن است. جدول ۵ نرخ ناسازگاری خروجی برای هریک از تصمیم‌گیرنده‌ها را ارائه می‌دهد. این اعداد پس از اجرای مدل در LINGO حاصل شده است. هرچه این عدد به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان از ناسازگاری کمتر نظرات تصمیم‌گیرنده و اتخاذ اعداد منطقی‌تری از سوی ایشان برای مقایسه بین معیارها بوده است.

با توجه به اینکه سناریوی ترکیبی دوم و سوم و سناریوی ترکیبی افزایش راندمان پمپ‌ها و سناریوی سوم هر دو جزء رده‌های اول و دوم سناریوهای انتخابی هستند، می‌توان سناریویی با ترکیب سناریوی افزایش راندمان آبیاری، استفاده از پنل‌های خورشیدی و افزایش راندمان پمپ‌ها پیشنهاد داد که بر مبنای فرضیات دو سناریوی قبلی و ترکیب آن‌ها به وجود آمده است و در این مرحله براساس نتایج، می‌توان این سناریو را نیز بدون محاسبات دیگری پیشنهاد داد.

محصولات کشاورزی با نیازآبی زیاد باید جزء محصولات وارداتی باشند؛ یعنی واردات آب مجازی به بیشترشدن پایداری منابع غذا و امنیت غذایی کمک نموده است. و همچنین محصولاتی که نیاز آبی کمتری دارند و بیشتر نیاز دام هستند مقداری از میزان واردات آن‌ها کاسته شود.

Table 4- Weights of BWM method

جدول ۴- وزن شاخص‌ها در روش BWM

Water Sustainability	Food Sustainability	Energy Sustainability	Nexus Sustainability	Co2 Emission	VWT
0.16	0.12	0.10	0.47	0.07	0.06

Table 5- Inconsistencies output

جدول ۵- نرخ ناسازگاری خروجی

ξ	0.17	0.416	0.17	0.213	0.15
Output Inconsistencies	0.056	0.138	0.056	0.071	0.049

۵- جمع بندی

بر اساس نتایج حاصل شده از سناریوها به عنوان جمع بندی نتایج تحقیق می توان به موارد ذیل اشاره نمود:

از آنجا که بخش کشاورزی به واسطه تأمین مواد غذایی کشور از اهمیت ویژه ای در اقتصاد و توسعه کشور برخوردار است؛ برای تأمین امنیت غذایی پایدار باید اقدامات مناسب توسعه ای انجام بگیرد. از طرف دیگر، بخش کشاورزی به صورت مستقیم وابسته به منابع آب است و مصرف کننده آب و برق است. آب مهم ترین عامل در تولید محصولات کشاورزی است و آب های زیرزمینی بخش عمده ای از تأمین آب را برعهده دارند. انتقال آب از اعماق مختلف زمین به سطح آن نیازمند انرژی است و این انرژی در حال حاضر به صورت عمده از سوخت های دیزلی تأمین می شود. در این میان به علت استفاده از روش های فرسوده قسمت اعظمی از منابع استراتژیک و تجدیدناپذیر هدر می رود.

به نظر می رسد در آینده نزدیک استفاده از پمپ های برقی به جای پمپ های دیزلی یکی از راهکارها و چالش های اساسی پیش رو است که نیازمند همکاری ارگان های مختلفی همچون وزارت نفت، وزارت جهاد کشاورزی و وزارت نیرو است. همچنین تأمین ارزان، مطمئن و به موقع انرژی الکتریکی مورد نیاز در این بخش با برق دار کردن تمامی چاه های کشاورزی منتج به کاهش میزان مصرف سوخت های فسیلی، کاهش انواع آلودگی از جمله کاهش انتشار گازهای گلخانه ای با تمرکز بر گاز کربن دی اکسید و مصرف انرژی به هنگام نیاز خواهد شد. این امر خود افزایش تولیدات کشاورزی، تسریع رشد اقتصادی و افزایش صادرات غیرنفتی در مواقع ضرور را در پی خواهد داشت. با توجه به نتایج، افزایش صادرات غیرنفتی همچون محصولات کشاورزی همیشه هم مقرون به صرفه نیست و در این راستا باید به میزان آب مجازی آن محصول براساس ارزش واقعی آب نیز توجه شود.

استفاده از سناریوهای انرژی و ترکیبی در راستای الف) تولید برق از منابع تجدیدپذیر و بهره وری انرژی برق؛ ب) کاهش تلفات در شبکه برق؛ ج) صرفه جویی در مصرف سوخت فسیلی؛ د) صرفه جویی در مصرف آب؛ ه) عدم انتشار گازهای گلخانه ای؛ و) افزایش تعداد نیروگاه های نصب شده و در حال احداث؛ ز) اشتغال زایی و ح) جذب سرمایه گذاری غیر دولتی حرکتی مثبت و رو به پیشرفتی دارد. پژوهش های آتی و به صورت کمی در زمینه های ذکر شده می تواند اهمیت استفاده از سناریوهای انرژی و ترکیبی را با جزئیات بیشتری نمایان سازد.

پی نوشت ها

- 1- Adaptive Network Based Fuzzy Inference System
- 2- Stockholm Environment Institute
- 3- Plant Growth Model
- 4- Reoperation
- 5- Reliability in Time
- 6- Reliability in Volume
- 7- Resiliency
- 8- Vulnerability
- 9- Best-Worst Method

۶- مراجع

- Arshadi M, Bagheri A (2014) A system dynamic approach to sustainability analysis in Karun River Basin, Iran. *Iran-Water Resources Research* 9(3):1-13(In Persian)
- Degirmencioglu A, Mohtar RH, Daher BT, Ozgunaltay-Ertugrul G, Ertugrul O (2019) Assessing the sustainability of crop production in the Gediz basin, Turkey: A water, energy, and food nexus approach. *Fresenius Environmental Bulletin* 28(4):2511-22
- Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L (1995) Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method. *Computers & Operations Research* 22(7):763-70
- Feng K, Siu YL, Guan D, Hubacek K (2012) Assessing regional virtual water flows and water footprints in the Yellow River Basin, China: A consumption based approach. *Applied Geography* 32(2):691-701
- Fu Y, Zhao J, Wang C, Peng W, Wang Q, Zhang C (2018) The virtual water flow of crops between intraregional and interregional in mainland China. *Agricultural water management* 208:204-13
- Karlberg L, Hoff H, Amsalu T, Andersson K, Binnington T, Flores-López F, de Bruin A, Gebrehiwot SG, Gedif B, Johnson O, zur Heide F (2015) Tackling complexity: Understanding the food-energy-environment nexus in Ethiopia's Lake tana sub-basin. *Water Alternatives* 8(1):710-734
- Karan E, Asadi S (2018) Quantitative modeling of interconnections associated with sustainable food, energy and water (FEW) systems. *Journal of Cleaner Production* 200:86-99
- King-Okumu C, Jaafar H, Aboukheira AA, Benzaiid M, Obando J, Hannachi A (2019) Tracing the trade-offs at the energy-water-environment nexus in drought-prone urbanising regions. *Arabian Journal of Geosciences* 12(20):639
- Lane BA, Sandoval-Solis S, Porse EC (2015) Environmental flows in a human-dominated system:

- Sandoval-Solis S, McKinney DC, Loucks DP (2011) Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 137(5):381-90
- Smajgl A, Ward J, Pluschke L (2016) The water–food–energy Nexus–Realising a new paradigm. *Journal of Hydrology* 533:533-40
- Varela-Ortega C, Blanco-Gutiérrez I, Swartz CH, Downing TE (2011) Balancing groundwater conservation and rural livelihoods under water and climate uncertainties: An integrated hydro-economic modeling framework. *Global Environmental Change* 21(2):604-19
- Yates D, Sieber J, Purkey D, Huber-Lee A (2005) WEAP21-A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water International* 30(4):487-500
- Yilmaz B, Harmancioglu N (2010) Multi-criteria decision making for water resource management: A case study of the Gediz River Basin, Turkey. *Water SA* 36(5):563-576
- Zayandab Consulting Engineering Company (2010) Hydrological modelling of Lenjanat. Technical Report (In Persian)
- Zhang C, Chen X, Li Y, Ding W, Fu G (2018) Water-energy-food nexus: Concepts, questions and methodologies. *Journal of Cleaner Production* 195:625-39
- Integrated water management strategies for the Rio Grande/Bravo Basin. *River Research and Applications* 31(9):1053-65
- Liang F, Brunelli M, Rezaei J (2020) Consistency issues in the best worst method: Measurements and thresholds. *Omega* 96:102175
- Loucks DP (1997) Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Sciences Journal* 42(4):513-30
- McMahon TA, Adedoye AJ, Zhou SL (2006) Understanding performance measures of reservoirs. *Journal of Hydrology* 324(1-4):359-82
- Ren D, Yang Y, Yang Y, Richards K, Zhou X (2018) Land-Water-Food Nexus and indications of crop adjustment for water shortage solution. *Science of the Total Environment* 626:11-21
- Rezaei J (2015) Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega* 53:49-57
- Safavi HR, Golmohammadi MH, Sandoval-Solis S (2015) Expert knowledge based modeling for integrated water resources planning and management in the Zayandehrud River Basin. *Journal of Hydrology* 528:773-89
- Sandoval-Solis S, McKinney DC (2011) Water planning and management for large scale river basins: Case of study of the Rio Grande/Rio Bravo transboundary basin. Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin