



Proposing the Structure of a Multi-Objective Mathematical Programming Model with Water-Food-Energy Nexus Approach for Crop Production

E. Ahani¹, S. Ziaee², H. Mohammadi³, M. Mardani Najafabadi^{4*}, A. Mirzaei⁵

Received: 28-07-2022

Revised: 02-10-2022

Accepted: 11-10-2022

Available Online: 11-10-2022

How to cite this article:

Ahani, E., Ziaee, S., Mohammadi, H., Mardani Najafabadi, M., & Mirzaei, A. (2023). Proposing the structure of a multi-objective mathematical programming model with water-food-energy nexus approach for crop production. *Journal of Agricultural Economics & Development* 37(1): 83-102. (In Persian with English abstract).
<http://doi.org/10.22067/jead.2022.77691.1147>

Introduction

With the growing population of the world, water, food and energy supply will be one of the most important challenges ahead. Agriculture as the most important food producer is not only the consumer of water and energy, but also the most important supplier of energy. As a result, a balance must be struck between harvesting and exploitation of production resources and the amount of agricultural production. Due to the close relationship between water-food-energy systems and also their interaction with each other, a new concept called the “nexus” approach has been proposed which refers to the integrated nature and interactions of water-food-energy planning. This approach has provided suitable options for political decision makers, managers and planners in order to conserve existing resources and achieve sustainable development.

Material and Methods

In this study, we have tried to introduce a mathematical programming model using multi-objective mathematical programming (MOP) technique for water-food-energy nexus that has the ability to process managerial decisions. In this model, in addition to examining the economic aspect, the control of greenhouse gas emissions has also been investigated. The regions of Mashhad, Chenaran and Torqabeh-Shandiz are the most important regions in the study area of Mashhad province in the production of crops. The data required for the study were collected through review of reports and agricultural statistical yearbooks of the year 2020-2021 and interviews with experts in each region and through consulting engineering companies. The hypothetical model under study includes lands covered by crops of Mashhad, Chenaran and Torqabeh-Shandiz. In this model, the water needed to irrigate crops is supplied from surface and groundwater sources. Electricity (electricity consumption) is used to collect and pump of irrigation water, produce food, and supply the domestic and industrial sectors. In the process of generating electricity, production of food, irrigation of crops and consumption of fertilizers and pesticides, greenhouse gases are emitted, especially CO₂. In this study, 6 objectives including: maximizing gross profit, maximizing the production of calories from food, minimizing emission of greenhouse gases, minimizing consumption of fertilizers and pesticides, minimizing consumption of irrigation water, and minimizing consumption of energy have been pursued.

1, 2 and 3- Ph.D. Student, Associate Professor and Assistant Professor of Agricultural Economics, Department of Agricultural Economics, University of Zabol, Iran, respectively.

4 and 5- Associate Professor and Assistant Professor of Agricultural Economics, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: m.mardani@asnrukh.ac.ir)

DOI: [10.22067/jead.2022.77691.1147](https://doi.org/10.22067/jead.2022.77691.1147)

Results and Discussion

The results of the proposed model showed that the rate of change in the level of cultivation area in MOP compared to the current cultivation pattern in Mashhad, Chenaran and Torqabeh-Shandiz decreased by 25.92%, 53.05% and 55.88%, respectively. The level of optimal cultivation for barley in Mashhad in order to maximize net profit objective increased by 16934 hectares (46.71%) and its maximizing caloric production equal to 8484 ha, which has decreased compared to the current pattern (22%). The cultivation area of barley in minimum irrigation water consumption decreased by 10877 hectares (1.11%) and in other minimization objectives it changed to 12892 hectares which increased by 17% in Mashhad region. Wheat, barley, alfalfa, corn, sugar beet, tomato and potato have the highest decrease in cultivation area in the MOP among crops. The total area of optimal cultivation in the net profit maximization model of Mashhad, Chenaran and Torqabeh-Shandiz equal to 48639, 26027 and 75 hectares, which showed an increase of 41.4%, 11.61% and 55.8%, respectively. Furthermore, in the model aimed at minimizing energy, irrigation water, fertilizer, pesticide consumption, and greenhouse gas emissions, the recommended cultivation areas are as follows: 25,475 hectares for energy consumption, 15,954 hectares for irrigation water consumption, and 100 hectares each for fertilizer consumption, pesticide consumption, and greenhouse gas emissions. These figures clearly indicate the need to reduce the cultivation area dedicated to agricultural products that have a significant environmental impact. Consequently, it is crucial to alter the cultivation pattern and adopt a strategy that focuses on producing crops with a lower environmental impact. By implementing this strategy, the objective is to cultivate crops that require less energy, irrigation water, fertilizer, and pesticides, while also minimizing greenhouse gas emissions. This approach aims to mitigate the environmental footprint associated with agricultural practices. By reducing the cultivation area for crops that have high environmental effects and transitioning towards crops that have a lesser impact on the environment, it is possible to achieve a more sustainable and environmentally friendly agricultural system.

Conclusion

The purpose of this study was to propose a nonlinear multi-objective mathematical programming model with water-food-energy nexus approach for crops in Mashhad province. In this study, in addition to economic relations, energy and environmental issues (greenhouse gas emissions) were also analyzed. The various components of the water-food-energy nexus, including energy supply planning, water supply and demand, food production, and control of greenhouse gas emissions, were modeled. The results showed that considering the MOP model based on economic and environmental objectives, the area under cultivation of wheat, barley, alfalfa, tomatoes, sugar beets and potatoes has significantly decreased. In other words, in order to achieve the objectives of maximum profit and minimum environmental impact, the area under wheat, barley, tomato, corn should be reduced and the area under cucumber, onion, potato and sugar beet should be increased. According to the results of this study, the following suggestions are presented:

- Implementation of the proposed optimal model of water-food-energy nexus allows farmers to simultaneously maintain economic income, environmental considerations, optimal and sustainable consumption of resources (water-food-energy) to select and consider suitable policies. So, it will only be a sustainable policy if it can be built within the combined framework of water, food, energy and the environment.
- In order to minimize the emission of greenhouse gases and its damage to the environment, the area under cultivation of agricultural products that have high environmental impact should be reduced, and in contrast to changes in cultivation pattern, the strategy to produce crops with less impact. Therefore, by developing a cropping pattern model, the productivity of the production capacities of the agricultural sector can be maximized and at the same time the damages and destructive consequences of crop production can be reduced.

Keywords: Agricultural planning, Multi-objective nonlinear programming, Water-food-energy nexus modeling

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، ص. ۸۳-۱۰۲

پیشنهاد یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه با رویکرد همبست آب- غذا - انرژی برای تولید محصولات زراعی

الهه آهنی^۱ - سامان ضیائی^۲ - حمید محمدی^۳ - مصطفی مردانی نجف آبادی^{۴*} - عباس میرزایی^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۹

چکیده

با افزایش رشد جمعیت و تنوع رژیم‌های غذایی، تقاضای غذا و به دنبال آن تقاضای آب و انرژی برای تولید غذا دچار تغییر و تحول شده است. رویکرد همبست آب- غذا- انرژی یک چشم‌انداز کلی از پایداری است که تلاش می‌کند تا تعادل میان اهداف مختلف، منافع و نیازهای جوامع و محیط‌زیست را براساس کمی‌سازی روابط آب- غذا- انرژی از طریق مدل‌سازی‌های کیفی و کمی و همچنین پیشبرد تحقیقات برای مدل‌سازی یکپارچه و مدیریت برای ارائه استراتژی‌های مهم توسعه پایدار در جهان پویا و پیچیده امروز را برقرار سازد. لذا پژوهش حاضر با هدف جلوگیری از ارائه و اجرای سیاست‌های نامناسب و تک‌بعدی در تولید محصولات زراعی، به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه با استفاده از رویکرد همبست آب- غذا- انرژی پرداخته است. این مدل در محدوده مطالعاتی مشهد در استان خراسان رضوی بکار گرفته و اهداف متفاوتی از جمله حداکثرسازی سودکشاورزان و انرژی حاصل از تولید موادغذایی (کالری) و حداقل‌سازی مصرف کود و سم، انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، آب‌آبیاری برای سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ در نظر گرفته شده است. با بکارگیری رویکرد همبست در انتخاب سطح زیرکشت محصولات زراعی محدوده مطالعاتی مشهد، سطح زیرکشت در الگوی بهینه ۴۸/۳۸ درصد، مصرف آب‌آبیاری ۲۵ درصد، انرژی ۵۳/۱۱ درصد و میزان تولید کالری محصولات ۳۳ درصد، مقدار مصرف سم و کود ۳۸/۳ درصد، هزینه‌های تولید ۶۰/۸ درصد، انتشار گازهای گلخانه‌ای ۴۰ درصد، مصرف سوخت دیزل ۳۸/۴ درصد و تولید کل ۳۳ درصد در الگوی چندهدفه برای محدوده مطالعاتی مشهد کاهش و سود خالص کشاورزان ۴۹/۳ درصد افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هرچند با در نظر گرفتن یک حوزه از حوزه‌های آب- غذا- انرژی بصورت مجزا اثرات تک‌بعدی هر یک از سیاست‌ها در بخش کشاورزی منعکس می‌شود، اما با استناد به تنها یک حوزه نمی‌توان در مورد اثربخشی سایر سیاست‌ها تصمیم‌گیری قطعی نمود. در مجموع در راستای تأمین امنیت غذایی با استفاده از همبست آب- غذا- انرژی بایستی مناطق مناسب برای کشت محصولات خاص در محدوده مطالعاتی مشهد شناسایی شود. در نهایت الگوهای کشت بهینه پیشنهادی که بر مبنای مدیریت صحیح منابع آب، انرژی، افزایش راندمان اقتصادی محصولات کشاورزی و حفاظت زیست‌محیطی تهیه شده به طور کامل اجرا شود.

طبقه‌بندی JEL: C02, C61, O13.

واژه‌های کلیدی: برنامه زراعی، برنامه‌ریزی غیرخطی چند هدفه، مدل‌سازی همبست آب- غذا- انرژی

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه زابل

۴ و ۵- به ترتیب دانشیار و استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

*- نویسنده مسئول: (Email: m.mardani@asnrukh.ac.ir)

مقدمه

محدودیت شده است. حوضه آبریز کشف‌رود و محدوده مطالعاتی مشهد بزرگترین و مهمترین زیرحوضه این رودخانه است، که در اثر محدودیت منابع آب سطحی، برداشت مازاد آب‌های زیرزمینی و افت شدید سطح آب و دیگر معضلات به وجود آمده در این حوضه، ادامه فعالیت در شرایط فعلی را برای کشاورزان و ساکنین منطقه ناممکن و آینده کشاورزان را به شدت تهدید می‌کند. عدم دسترسی محدود مطالعاتی مشهد^۱ به آب‌های سطحی سبب شده است که نیاز حقایق‌بران از طریق منابع آب زیرزمینی تأمین گردد. تولید غذا و انرژی در این محدوده علی‌رغم رفع نیاز جمعیت این دشت به خارج از حوضه نیز صادر می‌شود. این عمل وضعیت منابع آب این حوضه را به شدت تحت تأثیر قرار داده است. بنابراین به منظور مقابله با این شرایط و تأمین امنیت آب، غذا و انرژی برای ساکنان و کشاورزان این منطقه که یکی از بحرانی‌ترین حوضه‌های آبریز کشور می‌باشد مدلسازی روابط کمی ریاضی چند هدفه (MOP) با استفاده همبست آب- غذا - انرژی (WEFN)^۲ برای تولید محصولات زراعی امری ضروری بوده است.

آب، غذا و انرژی و امنیت هر سه سامانه بدون کاهش منابع طبیعی به‌عنوان یک چالش بزرگ در منطقه آسیا شناخته شده است. بدین جهت از سال ۲۰۱۵ به بعد سازمان ملل متحد مجموعه‌ای از اهداف توسعه پایدار مرسوم به (SDGs)^۳ با هدف دستیابی به توسعه پایدار درازمدت جوامع انسانی و تضمین فراهمی آب، غذا و انرژی به‌منظور پایداری برای نسل‌های آینده در دستور کار خود قرار داد (Bagheri, 2018; Chai et al., 2020; Fabiani et al., 2020). با توجه به ارتباط نزدیک سامانه‌های آب- غذا- انرژی و همچنین تأثیر متقابل آن‌ها بر یکدیگر، مفهوم جدیدی به نام رویکرد پیوندی^۴ یا رویکرد همبست مطرح شده است.

رویکرد هم بست آب - غذا - انرژی (WEFN) برای اولین بار در اجلاس بُن در سال ۲۰۱۱ در مجمع جهانی اقتصاد آلمان با هدف مواجهه با مشکلاتی از جمله کمبود منابع، ارائه شد. این رویکرد تلاش می‌کند تا با ارائه چارچوبی شفاف، هوشمند و منطقی، جوانب مختلف ارتباط میان این سه حوزه را بررسی نماید تا با انجام تحلیلی یکپارچه، درک بهتری از کنش و واکنش‌های موجود میان محیط زیست و فعالیت‌های انسانی فراهم آورد (Hoff, 2011). دستیابی به چنین ادراکی، با شناسایی ارتباط میان منابع موجود در این حوزه‌ها، منجر به

با افزایش رشد جمعیت و تنوع رژیم‌های غذایی، تقاضای غذا و به دنبال آن تقاضای آب و انرژی برای تولید غذا دچار تغییر و تحول شده است. آب، غذا و انرژی عناصر اصلی و ضروری نیازهای بشر هستند و ارتباط پیچیده و بدون حد و مرز میان این سه سامانه بیان‌گر وابستگی و اثرات متقابل آن‌ها بر یکدیگر در چرخه تولید است. در سراسر جهان آب، غذا و انرژی منابع حیاتی مهمی برای تأمین نیازهای اقتصادی- اجتماعی و رسیدن به توسعه پایدار اقتصادی هستند. این منابع به‌طور جدایی‌ناپذیری با یکدیگر در ارتباط اند، به‌طوری‌که هر یک از این منابع وابستگی قابل توجهی نسبت به یکدیگر دارند. کشاورزی به‌عنوان مهم‌ترین بخش تولیدکننده مواد غذایی نه‌تنها مصرف‌کننده آب (۹۰ درصد مصرف جهانی آب شیرین) و انرژی (۳۰ درصد از کل مصرف انرژی جهان) است، بلکه مهم‌ترین عرضه‌کننده انرژی نیز محسوب می‌شود (Bagheri, 2018). در فرآیند تولید غذا به منابع آب و انرژی، برای تولید انرژی به آب و برای دسترسی به آب به انرژی نیاز است، همچنین از سامانه غذا برای تولید انرژی استفاده می‌شود. در نتیجه باید تعادل و توازن بین جریان برداشت و بهره‌برداری از منابع تولید و میزان تولید محصولات کشاورزی ایجاد شود (Emamzadeh et al., 2016; Pu et al., 2022). با توجه به پیش‌بینی سازمان ملل متحد جمعیت کشورهای در حال توسعه از جمله ایران تا سال ۲۰۵۰ حدود ۵۰ درصد افزایش خواهد یافت (Safaei et al., 2020). این افزایش جمعیت باعث افزایش تقاضا برای مواد غذایی و به موازات آن باعث افزایش تنش در منابع محدود آب و انرژی در مقیاس‌های مختلف منطقه‌ای خواهد شد. بنابراین برنامه‌ریزی مناسب و مصرف بهینه منابع محدود آب، انرژی و غذا برای تأمین نیازهای اجتماعی و اقتصادی یک جامعه در شرایط کنونی و آینده در راستای توسعه پایدار و حفظ محیط‌زیست مسئله‌ای چالش‌برانگیز است. علی‌رغم بحران‌های زیست‌محیطی و آبی که امنیت غذایی و انرژی کشور را تهدید کرده است؛ در صورتی‌که اقدام اساسی برای استفاده بهینه از منابع محدود آب در دستور کار قرار نگیرد، به‌طور قطع مشکل‌هایی برای دستیابی به توسعه پایدار کشور ایجاد خواهند شد (Davari et al., 2016).

شمال شرق کشور دارای مناطقی است که به شدت دچار فقر منابع آبی شده و از نظر صنعت، توسعه اقتصادی و انرژی نیز دچار

۱- محدوده مطالعاتی مشهد قسمتی مرکزی و وسیع واقع در بخش میانه حوضه آبریز کشف رود می‌باشد که بخشی از شهرستان‌های طرقبه- شاندیز، چناران و مشهد را شامل می‌شود (شکل ۱).

- 2- Multi Objective Programming
- 3- Water Food Energy Nexues
- 4- Sustainable development goals
- 5- Nexus

آب- غذا - انرژي بعنوان بهترين راهكار در يك سيستم ايده آل انتخاب شده است.

اسماعيل زاده و همكاران (Esmailzadeh et al., 2020) طي پژوهشي در استان كرمان اظهار داشتند كه بيشتر تحليل هاي اقتصادي تنها بر افزايش سود اقتصادي كشاورزان بدون توجه به پيامدهاي زيست محيطي آن تمرکز دارند، بنا بر اين براي دستيابي به نتايج جامع تر بايستي مدل هاي برنامه ريزي رياضي بطور همزمان اهداف اقتصادي و زيست محيطي محصولات كشاورزي را در کنار ساير اهداف بصورت يکپارچه مورد بررسي قرار دادند. صفائي و همكاران (Safaei et al., 2020) رويكرد بهم پيوسته آب، انرژي و غذا در مديريت منابع آب محدوده مشهد با استفاده از دو رويكرد همبست و غير همبست مورد بررسي قرار دادند. نتايج حاكي از آن بود كه با مديريت بهم پيوسته منابع آب و انرژي، وضعيت حوزه آبريز مشهد بسيار بحراني تر از زماني است كه رويكرد همبست در نظر گرفته نشده باشد.

منعم و همكاران (Monem et al., 2019) روشي به منظور تجزيه و تحليل رابطه آب، غذا و انرژي در زنجيره توليد محصول در شبكه هاي آبياري زاينده رود استان اصفهان و ارزيابي كمّي آن ارائه داده اند. نتايج نشان داد در نظر گرفتن همزمان پيوند آب، غذا و انرژي در تحليل عملكرد شبكه هاي آبياري و انتخاب سياست هاي برتر امري ضروري است.

يو و همكاران (Yu et al., 2020) بهينه سازي مديريت منابع آب كشاورزي در شرايط عدم قطعيت با استفاده از رويكرد همبست و از طريق مدل هاي برنامه ريزي رياضي و چند هدفه انجام شد. مو و همكاران (Mo li et al., 2019) مدل برنامه ريزي رياضي چند هدفه (حداكثر سازي سود و حداقل انتشار گازهاي گلخانه اي) را با استفاده از رويكرد همبست آب- غذا- انرژي در حوضه رودخانه گواديانا (پرتغال و اسپانيا) بكار گرفتند. نتايج نشان داد مدل سازي همبست آب- غذا- انرژي در مناطقي كه با كمبود منابع مواجه هستند قابل انجام است. ني و همكاران (Nie et al., 2019) تخصيص و بهينه سازي سطح زيركشت محصولات كشاورزي را تحت رويكرد همبست آب- غذا- انرژي از طريق مدل هاي برنامه ريزي رياضي راهكاري جهت دستيابي به توسعه پايدار اقتصادي، اجتماعي و زيست محيطي معرفي كردند. ويكاسونو و كانگ (Wicaksono and Kang, 2019) مطالعه اي را با موضوع شبیه سازي پيوند آب- غذا- انرژي در دو كشور كره جنوبي و اندونزي ثبت كردند. نتايج مطالعه در دو كشور نشان داد كه مدل هاي شبیه سازي همبست مي توانند امنيت منابع آب، غذا و انرژي را در شرايط آينده با قابليت اطمینان بالايي بررسي كنند و مديران مي توانند از اين ابزارها در تصميم گيري هاي خود بهره مند شوند. ژانگ و وسلينو (Zhang and Vesselinov, 2018) كاربرد مدل هاي برنامه ريزي رياضي را در همبست آب- غذا- انرژي بهترين راه براي تخصيص منابع آب معرفي كردند.

انتخاذه برنامه ها، تصميم گيري ها و سياست هاي جامع تر و امنيت آب، غذا و انرژي در نهايت توسعه كشور به سمت رفع موانع و مشكلات پيش رو و برقراري پايداري بلندمدت را به دنبال دارد (Fabiani et al., 2020; Bagheri, 2018). از مهمترين مزياي اين رويكرد به بهبود بهره وري استفاده از منابع و دوري از اثرات نامطلوب سياست هاي توسعه اي تک بخشی نيز اشاره شده است. عدم هماهنگي و تعامل ضعيف ميان بخش هاي اقتصادي، اجتماعي و زيست محيطي باعث بهره برداري ناپايدار از ساير منابع از جمله آب، انرژي، زمين شده است و در نتيجه تهديددي براي امنيت آب و غذا و رسيدن به اهداف توسعه پايدار خواهد بود. بنا بر اين با تأكيد بر يك سياست در مديريت هر يك از منابع به تنهائي، باعث ايجاد بروز مسائل مختلف در ساير منابع خواهد بود (Kalbali et al., 2021).

افزايش كارايي استفاده از منابع و کاهش خطرات محيط زبستي و تخريب اکولوژيكي نيازمند مديريت جامع و مشترك اين منابع با استفاده از رويكرد همبست مي باشد (Karabulut et al., 2018; Safaei et al., 2020). عبارتي بكارگيري رويكرد همبست مي تواند (Mirabi and Karabi, 2018) راهكارهاي مناسب براي تصميم گيران سياسي، مديران و برنامه ريزان در جهت حفاظت از منابع موجود و دستيابي به توسعه پايدار ارائه دهد (Bagheri, 2018).

محققان بر اين اعتقادند كه بحران آب، انرژي و غذا در آينده ايران واقعي بوده و هشدار دهنده است، بدین منظور ايجاد يك شبكه پيوند براي ارائه دانش نوين برنامه ريزي و سياست گذاري در بخش هاي آب، انرژي و غذا در كشور لازم بوده و زمينه را براي تبادل آرا و همفكري با كمك توسعه دانش فني به ويژه در تعاملات گروه داران و كنشگران فراهم مي نمايد (Safaei et al., 2020). بنا بر اين مطالعات محدوددي در داخل و خارج در دهه هاي اخير و تاكنون به بررسي همبست آب- غذا- انرژي از طريق مدل هاي برنامه ريزي رياضي پرداخته اند.

از مهمترين اين مطالعات مي توان به مدل سازي رويكرد همبست آب- غذا- انرژي و ميزان پايداري اجتماعي و محيط زبستي آن در شهرستان ورامين اشاره نمود (Safavi and Ehteshami., 2022). نتايج نشان داد مديريت تلفيقي عرضه و تقاضا براي توسعه توأمان صنعت و كشاورزي نسبت به بهره گيري به شيوه مجزا بهتر توانسته اهداف توسعه را در پايدارترين حالت محقق نمايد. در مطالعه كلبعلي و همكاران (Kalbali et al., 2021) يك مدل برنامه ريزي رياضي جهت مديريت منابع آب و تخصيص سطح زيركشت در حوضه آبريز قره سو توسعه داده شد. كيهان پور و همكاران (Keyhanpour et al., 2021) طي پژوهشي به تحليل ديناميكي سياست هاي مديريت پايدار منابع آب مبتني بر همبست منابع آب- غذا - انرژي با توجه به تغييرات تقاضاي حاصل از رشد جمعيت و رشد اقتصادي در افق ۲۰ ساله با استفاده از رويكرد پويابي سيستم پرداخته اند. نتايج نشان داد شبیه سازي و ارائه راهكارهاي پيشنهادهي با استفاده از همبست منابع

بخش خانگی و صنعت استفاده می‌شود. همچنین در فرآیند تولید و فرآوری مواد غذایی منابع آب (سطحی و زیرزمینی) و انرژی مورد نیاز است. در فرآیند تولید برق، مواد غذایی، آبیاری محصولات و مصرف کودها و سموم شیمیایی نیز گازهای گلخانه‌ای به خصوص CO₂ منتشر می‌شود. بنابراین در این مطالعه سعی می‌شود یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه (MOP) برای همبست آب-غذا-انرژی معرفی شود که توانایی پردازش تصمیمات مدیریتی را داشته باشد. در این مدل، علاوه بر بررسی جنبه اقتصادی، کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای و زیست‌محیطی نیز بررسی می‌شود.

برنامه‌ریزی چندهدفه (MOP)

ساختار اصلی برنامه‌ریزی ریاضی در خصوص تعیین الگوی کشت محصولات زراعی تحت رویکرد همبست آب-غذا-انرژی، مبتنی بر مطالعات اخیر می‌باشد (Mo li et al., 2019; Esmailzadeh et al., 2020). این الگو شامل قسمت‌های توابع هدف: حداکثر سازی سود، حداکثر سازی تولید کالری، حداقل انتشار گازهای گلخانه‌ای، حداقل مصرف آب آبیاری، حداقل مصرف کود و سم و حداقل انرژی مصرفی و محدودیت‌های مربوط آب، زمین، کود، سم و انرژی بوده که متعاقباً بررسی می‌گردد. قبل از معرفی مدل برنامه‌ریزی ریاضی مورد استفاده و با توجه به تعداد زیاد مجموعه‌ها، متغیرها و پارامترهای به کار رفته در مطالعه، خلاصه‌ای از نمادها و تعاریف هر کدام از این اجزاء در جدول ۱ ارائه شده است.

در یک چرخه همبست آب-غذا-انرژی، آب نقش مهمی را در هر یک از مراحل توسعه انرژی شامل استخراج، تولید و فرآوری سوخت‌های فسیلی، تولید برق و تصفیه ضایعات مربوط به فعالیت‌های انرژی ایفا می‌کند. از طرف دیگر، آب و انرژی برای تولید مواد غذایی در کشاورزی مورد نیاز است، که عمدتاً برای آبیاری، تولید و فرآوری محصولات کشاورزی استفاده می‌گردد. در مدیریت آب، برای عملیات پمپاژ، جمع‌آوری، تصفیه و توزیع آب، لازم است انرژی مصرف شود. انرژی در تولید مواد غذایی و پردازش مکانیزه، آماده‌سازی زمین، تولیدات کود، ابزارهای کشاورزی، آبیاری، بسته‌بندی، فرآوری و ذخیره‌سازی مواد غذایی مورد نیاز است، که براساس بررسی‌های انجام شده حدود ۳۰ درصد از کل مصرف انرژی جهان مربوط به مراحل تولید و عرضه مواد غذایی است (Eslami et al., 2019). از طرفی برخی از منابع تولید انرژی تجدیدناپذیر هستند که استفاده از آنها باعث تولید گازهای گلخانه‌ای می‌شود.

بررسی‌های انجام شده در مرور منابع مشخص گردید که تاکنون پژوهشی در راستای رویکرد همبست آب-غذا-انرژی از طریق مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای تولید محصولات زراعی در داخل کشور صورت نگرفته است. لذا هدف از انجام این مطالعه پیشنهاد یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه با بکارگیری رویکرد همبست آب-غذا-انرژی در محدوده مطالعاتی مشهد با هدف حداکثر سازی سود خالص، حداکثر سازی تولید کالری، کاهش (انتشار گازهای گلخانه‌ای، انرژی، مصرف آب آبیاری و مصرف سموم و کودهای شیمیایی) با توجه به محدودیت‌های آب، زمین، کود و غیره برای تخصیص بهینه به محصولات کشاورزی است. در این مطالعه تلاش شده است با استفاده از روش برنامه‌ریزی ریاضی، امکان مصالحه‌ای بین اهداف حداکثر و حداقل سازی بصورت رویکرد همبست در سه سامانه آب-غذا-انرژی برای محصولات زراعی منطقه بررسی شود. به این امید که اطلاعات سودمندی جهت تدوین استراتژی‌های مناسب برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش درآمد کشاورزان در محدوده مطالعاتی مشهد فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

الگوهای برنامه‌ریزی ریاضی با توجه به قابلیت منحصر به فردی که در ارتباط بین اجزاء اقتصادی با جنبه‌های بیوفیزیک و اکولوژی دارند، امروزه بعنوان یکی از ابزارهای رایج و کارآمد در تحلیل مسائل اقتصاد کشاورزی کاربرد دارند (Buysse et al., 2007). به بیان هیزل و نورتون (۱۹۸۶) اگرچه سایر الگوها نیز ممکن است با درجات مختلفی از این قابلیت برخوردار باشند، اما الگوهای برنامه‌ریزی ریاضی با توجه به توانایی الگوسازی ماهیت چندگانه و به شدت وابسته فعالیت‌های کشاورزی، از مزیت منحصر به فردی در تحلیل سیاست‌های بخش کشاورزی برخوردارند. الگوسازی برنامه‌ریزی ریاضی از طریق ادغام روابط بین اجزاء مدل و محدودیت‌های موجود براساس همبست آب-غذا-انرژی نتایج جامع‌تر عبارتی نزدیک به واقعیت ارائه می‌دهد. در این بخش توسعه مدل بهینه‌سازی مدیریت همبست آب-غذا-انرژی (WEFN) در چند بخش اقتصادی-زیست‌محیطی براساس مطالعه (Mo li et al., 2019) توصیف شده است. این مدل توانایی مدل سازی تعاملات و برهمکنش سه سامانه آب-غذا-انرژی از جمله عرضه- تقاضا آب، عرضه- تقاضای انرژی، تقاضای زمین، عملکرد محصولات، تخصیص آب و انرژی را دارد. مدل فرضی مورد بررسی، شامل اراضی تحت پوشش محصولات زراعی شهرستان‌های مشهد، چناران و طرقبه- شاندیز است. در این مدل، آب مورد نیاز برای آبیاری محصولات زراعی، از منابع آب سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شود. برق (الکتروسیته مصرفی) که برای جمع‌آوری و پمپاژ آب مورد نیاز در نیروگاه‌ها، تولید مواد غذایی و تأمین

جدول ۱- فهرست نمادهای مورد استفاده در مدل برای تعريف مجموعه‌ها، متغیرها و پارامترها
 Table 1- List of symbols used in the model to define sets, variables and parameters

شرح Description	اندیس Index	شرح Description	اندیس Index
مجموع محصولات زراعي Total crops	$K \in \{1, \dots, 9\}$	مجموع مناطق Total Areas	$I \in \{1, 2, 3\}$
مقدار بارش مؤثر برای هر محصول در هر منطقه (متر مکعب / هکتار) Effective precipitation amount for subarea (m ³ /ha)	Ep_P_{ik}	هدف حداکثرسازی سود ناخالص کشاورزان The goal is to maximize the gross profit of farmers	$Obj1Profit_V$
عملکرد محصولات هر منطقه Production yield of each region	Y_P_{ik}	هدف حداقل‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای Minimize greenhouse gas emissions	$Obj2 CO2_V$
میزان انرژي توليد شده حاصل از مصرف يك واحد وزني از محصولات زراعي The Amount of Energy Produced From the Consumption of one unit of weight of Crops	En_P_k	هدف حداقل‌سازی مصرف آب Minimize water consumption	$Obj4 Wat_V$
هزینه بهره‌برداری از آب‌های سطحی برای آبیاری برای محصولات زراعي هر منطقه Cost of exploiting surface water for irrigation for crops in each region	Csw_P_{ik}	هدف حداقل‌سازی مصرف انرژي Minimize Energy consumption	$Obj5Energy Elec_V$
ضریب بهره‌برداری از آب‌های سطحی Surface water utilization coefficient	$Ucsw_P_i$	هدف حداکثرسازی تولید کالری از موادغذایی Maximize calorie production from food	$Obj6 Coleri_V$
هزینه بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی برای آبیاری برای محصولات زراعي هر منطقه The cost of using groundwater for irrigation for crops in each area	CGw_P_{ik}	هدف حداقل‌سازی مصرف سم کود و سم Minimize fertilizers and pesticides consumption	$Obj3 FP_V$
ضریب انتشار کربن در استفاده از کودها (کیلوگرم / Co ₂ کیلوگرم) Carbon emission coefficient in the use of fertilizers (kg / Co ₂ kg)	Cef_P	مقدار انرژي تخصیص داده شده برای منابع آب هر منطقه (کیلو وات. ساعت) The amount of energy allocated to water resources in each area (kWh)	Eaw_V_i
ضریب انتشار کربن در استفاده از سوخت دیزل (کیلوگرم / Co ₂ لیتر) Carbon emission coefficient in the use of diesel fuel (kg / co ₂ liters)	Ced_P	مقدار انرژي تخصیص داده شده برای تولید و فرآوری مواد غذایی هر منطقه (کیلو وات. ساعت) Amount of energy allocated for food production and processing in each region (kWh)	Eaf_V_i
ضریب انتشار کربن در استفاده از رول‌های نایلونی کشاورزی (کیلوگرم / Co ₂ کیلوگرم) Carbon emission coefficient in the use of agricultural nylon rolls (kg / Co ₂ kg)	$Ceaf_P$	مقدار خالص تخصیص آب‌های زیرزمینی برای تولید مواد غذایی به محصولات زراعي هر منطقه (مترمکعب) Net amount of groundwater allocation for food production to crops in each area (cubic meters)	Gwf_V_{ik}
ضریب انتشار کربن در استفاده از سموم دفع آفات (کیلوگرم / Co ₂ کیلوگرم) Carbon emission coefficient in the use of pesticides (kg / Co ₂ kg)	Cep_P	میزان خالص تخصیص آب‌های سطحی برای تولید موادغذایی به محصولات زراعي هر منطقه (مترمکعب) Net allocation of surface water for food production to crops in each region (cubic meters)	Swf_V_{ik}

ضریب انتشار کربن از برق برای فرآوری مواد غذایی (کیلوگرم CO ₂ /کیلو وات. ساعت)	Cefp_P	مقدار برق تخصیص داده شده به آب‌های سطحی برای محصولات زراعی هر منطقه (کیلو وات. ساعت) Amount of electricity allocated to surface water for crops in each area (kWh)	Esw_V _{ik}
مقدار برق مصرفی در هکتار هر منطقه (کیلو وات. ساعت / هکتار) Amount of electricity consumed per hectare per area (kWh / hectare)	Eu_P _{ig}	مقدار برق برای استخراج آب‌های زیرزمینی برای محصولات زراعی هر منطقه (کیلو وات. ساعت) Amount of electricity for groundwater extraction for crops in each area (kWh)	Egw_V _{ik}
مقدار قابل دسترس انرژی برای منطقه i (کیلو وات. ساعت) Available amount of energy for zone i (kWh)	Ea_P _i	مقدار برق مصرفی برای تولید مواد غذایی و فرآوری محصولات زراعی هر منطقه (کیلو وات. ساعت) Amount of electricity consumed for food production and processing of crops in each region (kWh)	Efp_V _{ik}
قیمت فروش محصول (ریال / کیلوگرم) The selling price of the product (Rial/Kg)	Price_p _k		
آب عرضه شده از پروژه‌های آبرسانی Water supplied from water supply projects	Sws_P _i	سطح زیرکشت تخصیص یافته برای تولید مواد غذایی به محصولات زراعی در هر منطقه (هکتار) Cultivated area allocated for food production to crops of each region (hectares)	A_V _{ik}
حداکثر تقاضای هر منطقه برای محصول Max demand of each region for the product	Deman_P _{ik} ^{Max}		
حداقل تقاضای منطقه برای محصول Min demand of each region for the product	Deman_P _{ik} ^{Min}	نسبت بهره‌برداری از آب‌های سطحی کشاورزی هر منطقه Ratio utilization ratio of agricultural surface waters in each region	Pasw_P _i
ضریب بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی Groundwater utilization coefficient	Ucgw_P _i	نسبت بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی کشاورزی هر منطقه Agricultural groundwater utilization ratio of each region	Pagw_P _i
هزینه‌های برق مصرفی برای جمع‌آوری انتقال و آب در هر منطقه Electricity costs for water collection and transmission in each area	Ceuw_P _i	نیاز آبی محصولات زراعی هر منطقه (مترمکعب / هکتار) Water requirement of crops in each region (cubic meters / hectare)	Wr_P _{ik}
هزینه‌های مصرف برق برای فرآوری مواد غذایی هر منطقه Electricity consumption costs for food processing in each region	Ceuf_P _i	حداقل زمین تخصیص داده شده به محصولات زراعی هر منطقه (هکتار) Minimum land allocated to crops in each area (hectares)	A_P _{ik} ^{min}
هزینه‌های مصرف کود به ازای هر واحد برای محصولات زراعی هر منطقه Fertilizer consumption costs per unit for crops in each region	Cf_P _{ik}	حداکثر زمین برای محصولات زراعی در منطقه (هکتار) Maximum land for crops in area (h)	A_P _{ik} ^{max}
مقدار مصرف سموم دفع آفات در هکتار هر منطقه (کیلوگرم / هکتار) Amount of pesticides per hectare (kg / ha)	Ptu_P _{ik}	هزینه‌های مصرف سموم دفع آفات در هکتار محصولات زراعی هر منطقه Costs of pesticides per hectare of crops in each region	Cp_P _{ik}

مقدار مصرف رول‌هاي نايلوني كشاورزي (كيلوگرم/هكتار) Consumption of agricultural nylon rolls (kg / ha)	Af_{P_i}	هزينه عمليات ماشين‌آلات كشاورزي به ازاي هر واحد براي محصولات زراعي در منطقه Cost of operating agricultural machinery per unit for crops in Area	$Cam_{P_{ik}}$
مقدار مصرف سوخت ديزل در هكتار هر منطقه (ليتر/هكتار) Diesel fuel consumption per hectare per area (liters / hectare)	Da_{P_i}	هزينه رول‌هاي نايلوني كشاورزي در هكتار محصولات زراعي (ميليون ريال/ هكتار) Cost of agricultural nylon rolls per hectare of crops (million rials / hectare)	Caf_{P_k}
كل هزينه‌ها (ميليون ريال/ هكتار) Total Costs (Milio Rial/ha)	$Cost_{P_{ik}}$		
ضريب انتشار كربن از برق براي آبياري (كيلوگرم/ ساعت) Carbon emission coefficient from electricity for irrigation (kg / co2 kWh)	Cei_{P_i}	ميزان برق مصرفي به ازاي هر واحد پمپاژ آب‌هاي سطحي در هر منطقه (كيلوات ساعت/ مترمكعب) Electricity consumption per unit of surface water pumping in each area (kWh / cubic meter)	$Eusw_{P_i}$
انرژي مصرفي بخش صنعت و خانگي در هر منطقه (كيلو وات. ساعت) Energy consumption of industry and home sector in each region (kWh)	$Ecil_{P_i}$	ميزان برق مصرفي به ازاي هر واحد استحصال آب‌هاي زيرزميني در هر منطقه (كيلوات ساعت/ مترمكعب) The amount of electricity consumed per unit of groundwater extraction in each area (kWh / cubic meter)	$Eugw_{P_i}$
تامين آب‌هاي سطحي هر منطقه (مترمكعب) Surfacewater supply in each area (cubic meters)	sws_{P_i}	ميزان برق مصرفي به ازاي هر واحد توليد مواد غذايي براي محصولات زراعي در هر منطقه (كيلوات ساعت/ كيلوگرم) Electricity consumption per unit of food production for crops in each region (kWh / kg)	$Eufp_{P_{ik}}$
تامين آب‌هاي زيرزميني به صورت پمپاژ زيرزميني هر منطقه (مترمكعب) Groundwater supply in the form of groundwater pumping in each area (cubic meters)	Gws_{P_i}	ميزان مصرف کود در هكتار هر منطقه (كيلوگرم / هكتار) Fertilizer consumption per hectare per area (kg / hectare)	$Fu_{P_{ik}}$

منبع: يافته‌هاي پژوهش. (P: نماد پارامتر و V: نماد متغير است).

Source: Research Findings. (P: parameter symbol and V: variable symbol).

با اين تفاسير، متغيرهاي تصميم مدل چندهدفه غيرخطي براي همبست آب- غذا- انرژي شامل: مقدار انرژي تخصيص داده شده براي استحصال آب در هر منطقه (كيلوات- ساعت) كه بيانگر رابطه (انرژي- آب) است، مقدار قابل دسترس انرژي براي توليد و فرآوري مواد غذايي در هر منطقه (كيلوات- ساعت) كه رابطه (انرژي- غذا) را توصيف مي‌كند، ميزان خالص تخصيص آب‌هاي سطحي و زيرزميني براي توليد مواد غذايي به محصولات زراعي هر منطقه (ميليون متر مكعب) بيانگر رابطه (آب- غذا) است، مقدار كل برق مصرفي (استحصال آب‌هاي سطحي و استخراج يا پمپاژ آب‌هاي زيرزميني براي محصولات زراعي هر منطقه (كيلوات- ساعت)، مقدار برق مصرفي براي توليد مواد غذايي و فرآوري محصولات زراعي هر منطقه (كيلوات- ساعت) و اراضي تخصيص يافته براي توليد مواد غذايي به محصولات زراعي هر منطقه (هكتار) مي‌باشد.

با توجه به اينكه در رويكرد همبست آب- غذا- انرژي ابعاد مختلف اقتصادي، اجتماعي و زيست محيطي بررسي مي‌شود، بنا بر اين مدل سازي اين مطالعه با توجه به سه سامانه آب- غذا - انرژي و جنبه‌هاي مختلف آن، اهداف متفاوتي را نيز شامل مي‌شود. به علت انعطاف در مدل استفاده شده به راحتی مي‌توان اهداف متفاوت را از جنبه‌هاي مختلف مورد بررسي قرار داد. لذا در مطالعه حاضر 6 هدف شامل: حداكثر سازي سود ناخالص و حداكثر توليد كالري از مواد غذايي و اهداف حداقل سازي شامل: انتشار گازهاي گلخانه‌اي، مصرف کود و سم، آب آبياري و انرژي دنبال شده و شكل جبري اين اهداف در معادلات 1 تا 6 بيان شده است (Mo li et al., 2019).

$$Max: Obj1Profit_V =$$

$$\sum_{i=1}^I \left[(Price_{P_k} \cdot \sum_{k=1}^K Y_{P_{ik}} \cdot A_{V_{ik}}) - \right.$$

معادله ۹ وجود دارد.

$$Eaw_{Vi} + Eaf_{Vi} \leq Ea_{Pi} - Ecil_{Pik} \quad \forall_i \quad (9)$$

میزان تخصیص آب‌های سطحی برای همه محصولات در هر منطقه نباید بیشتر از آب عرضه شده از طریق پروژهای آبرسانی، مانند پروژه انتقال آب، پروژه ذخیره آب و پروژه‌های آبرسانی باشد. این محدودیت در معادله ۱۰ وجود دارد.

$$\frac{\sum_{k=1}^k Swf_{Vik}}{Ucsw_{Pi}} \leq Sws_{Pi} \cdot Pasw_{Pi} \quad \forall_i \quad (10)$$

مشابه آب‌های سطحی، تخصیص آب‌های زیرزمینی برای همه محصولات منطقه نباید بیشتر از میزان پمپاژ آب زیرزمینی باشد (معادله ۱۱).

$$\frac{\sum_{k=1}^k Gwf_{Vik}}{Ucgw_{Pi}} \leq Gws_{Pi} \cdot Pagw_{Pi} \quad \forall_i \quad (11)$$

مقدار آب تخصیص یافته و بارندگی موثر برای هر محصول در هر منطقه باید نیاز آبی برای تولید مواد غذایی را تأمین نماید (معادله ۱۲).

$$Swf_{Vik} + Gwf_{Vik} + (Ep_{Pik} \cdot A_{Vik}) \geq Wr_{Pik} \cdot A_{Vik} \quad \forall_i \quad (12)$$

میزان حداکثر و حداقل زمین قابل کشت برای همه محصولات به صورت معادله ۱۳ تعیین می‌شود.

$$A_{Pik}^{min} \leq A_{Vik} \leq A_{Pik}^{max} \quad \forall_i, k \quad (13)$$

میزان تولید هر محصول نباید از مقدار حداکثر و حداقل تقاضای آن انحراف پیدا کند. این محدودیت در معادله ۱۴ و ۱۵ وجود دارد.

$$\sum_{i=1}^I A_{Vik} \cdot Y_{Pik} \leq Deman_{Pik}^{Max} \quad \forall_k, i \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^I A_{Vik} \cdot Y_{Pik} \geq Demand_{Pik}^{Min} \quad \forall_k, i \quad (15)$$

توجه شود که معادله ۱۵ با اعمال یک حداقل مورد نیاز از محصولات، در بحث امنیت غذایی دخیل است. بعبارت دیگر، علاوه بر هدف حداکثر سازی تولید کالری از طریق مصرف مواد غذایی (معادله ۶) در این معادله نیز به موضوع امنیت غذایی پرداخته شده است.

در نهایت مجموعه غیرمنفی متغیرهای مدل به صورت معادله ۱۶ تعیین می‌شود.

$$\begin{aligned} Swf_{Vik} &\geq 0 & \forall_i, k \\ Gwf_{Vik} &\geq 0 & \forall_i, k \\ A_{Vik} &\geq 0 & \forall_i, k \\ Esw_{Vik} &\geq 0 & \forall_i, k \\ Egw_{Vik} &\geq 0 & \forall_i, k \\ Efp_{Vik} &\geq 0 & \forall_i, k \\ Eaw_{Vi} &\geq 0 & \forall_i, k \\ Eaf_{Vi} &\geq 0 & \forall_i, k \end{aligned} \quad (16)$$

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی مشهد در غرب حوضه آبریز قره‌قوم و در شمال استان خراسان رضوی، در محدوده به طول ۵۸ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۶

$$\left(Csw_{Pik} \cdot \left(\sum_{k=1}^K \frac{Swf_{Vik}}{Ucsw_{Pi}} \right) + CGw_{Pik} \cdot \left(\sum_{k=1}^K \frac{Gwf_{Vik}}{Ucgw_{Pi}} \right) + (Ceuw_{Pi} (\sum_{k=1}^K Esw_{Vik} + Egp_{Vik}) + Ceuf_{Pi} (\sum_{k=1}^K Efp_{Vik}) + \sum_{k=1}^K Cf_{Pik} + CP_{Pik} + Cam_{Pik}) + (Cost_{Pik} + Caf_{Pk}) \cdot (\sum_{k=1}^K A_{Vik}) \right) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Min: Obj2 CO2_V = & \sum_{i=1}^I \left(Ced_{p_Du_Pik} \sum_{k=1}^K A_{Vik} + Ceaf_{p_Af_Pi} \sum_{k=1}^K A_{Vik} + Cep_{p_Pu_Pik} \sum_{k=1}^K A_{Vik} + Cei_{p_Eu_Pik} \sum_{k=1}^K A_{Vik} + Cefp_{p_Efp_Vik} + Cef_{p_Fu_Pik} \sum_{k=1}^K A_{Vik} \right) \quad (2) \end{aligned}$$

$$Min: Obj3 FP_V = \sum_{i=1}^I (Fu_{Pik} \sum_{k=1}^K A_{Vik} + Pu_{Pik} \sum_{k=1}^K A_{Vik}) \quad (3)$$

$$Min: Obj4 Wat_V = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K ((Swf_{Vik} / Ucsw_{Pi}) + (Gwf_{Vik} / Ucgw_{Pi})) \quad (4)$$

$$Min: Obj5 Energy Elec_V = \sum_{i=1}^I (Eaw_{Vi} + Eaf_{Vi}) \quad (5)$$

$$Max: Obj6 Coleri_V = \sum_{i=1}^I (En_{Pk} \cdot Y_{Pik} \sum_{k=1}^K A_{Vik}) \quad (6)$$

با توجه به اهداف ذکر شده، در نظر گرفتن چند هدف متفاوت منجر به یک الگوسازی در قالب یک برنامه‌ریزی چندهدفه (MOP) می‌شود. در مطالعه حاضر، برای متجانس کردن اهداف، از چارچوب کلی مدل برنامه‌ریزی غیرخطی چندهدفه برگرفته از مطالعات [Buysse et al., 2007](#); [Mardani Najafabadi et al., 2019](#); [Marzban et al., 2020](#) استفاده شده است.

توابع اهداف مشروط به محدودیت‌هایی است که در ادامه بیان خواهد شد.

میزان برق مصرفی برای تخصیص و توزیع آب‌های سطحی و پمپاژ آب‌های زیرزمینی نباید از میزان مجاز آن برای هر منطقه بزرگتر باشد. این محدودیت در معادله ۷ وجود دارد.

$$Eusw_{Pi} \left[\left(\frac{\sum_{k=1}^k Swf_{Vik}}{Ucsw_{Pi}} \right) + Eugw_{Pi} \left[\left(\frac{\sum_{k=1}^k Gwf_{Vik}}{Ucgw_{Pi}} \right) \right] \right] \leq Eaw_{Vi} \quad (7)$$

مقدار انرژی مصرفی در فرآیند تولید و فرآوری مواد غذایی نباید بیشتر از مقدار انرژی تخصیص داده شده در فرآیند تولید و فرآوری مواد غذایی در منطقه باشد. این محدودیت در معادله ۸ بیان شده است.

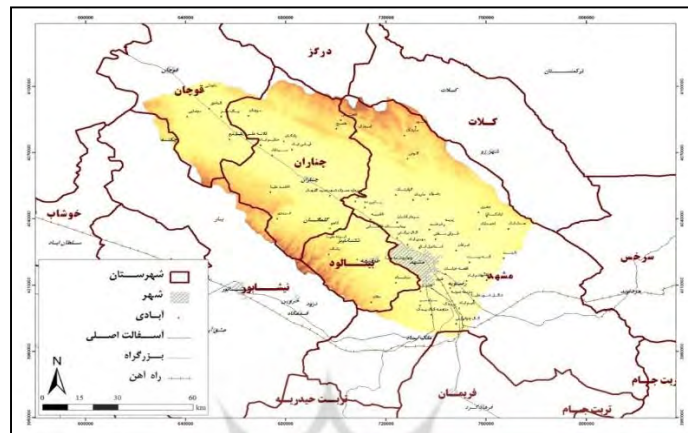
$$\sum_{k=1}^k (Eufp_{Pik} \cdot Y_{Pik}) \cdot A_{Vik} \leq Eaf_{Vi} \quad \forall_i \quad (8)$$

دسترسی به انرژی برای تخصیص و انتقال آب‌های سطحی، پمپاژ آب‌های زیرزمینی، تولید و فرآوری غذا نباید بیشتر از کل انرژی قابل دسترس برای کشاورزی در هر منطقه به استثناء دسترسی به کل انرژی مصرفی بخش‌های خانگی و صنایع باشد. این محدودیت در

(*et al.*, 2018).

به دليل اين كه برنامه‌ريزي‌هاي ملي و منطقه‌اي براساس مرزهاي سياسي و در سطح شهرستان‌ها انجام مي‌شود، در شكل ۱ موقعيت محدوده مطالعاتي مشهد و مرز شهرستان‌هاي واقع در آن ارائه شده است.

درجه و ۳ دقيقه شمالي واقع شده است. مساحت محدوده برابر ۹۹۰۸ كيلومتر مربع بوده و ارتفاع متوسط آن از سطح دريا برابر با ۱۴۹۷ متر است. براساس آخرين مالعات بيلان منابع آب ميانگين بارش ۴۵ ساله در سطح محدوده مطالعاتي، ۲۷۰ ميلي متر است. مهمترين رودخانه آن كشف‌رود مي‌باشد كه از سرشاخه‌هاي رودخانه هري‌رود بوده و در نهايت به كوير قره‌قوم در خاك تركمنستان مي‌ريزد (*Azamirad et*



شكل ۱- محدوده مطالعاتي مشهد، شهرستان‌ها، مراكز شهري و روستايي
منبع: (كتاب آب استان خراسان رضوي، ۲۰۱۶)

Figure 1- Mashhad study area, cities, urban and rural centers
Source: (water book of Khorasan Razavi province., 2016)

سبزيجات داراي رتبه‌هاي اول تا سوم مي‌باشد (Agricultural Jihad Organization, 2019-2020). داده‌هاي مورد نياز مطالعه، از طريق بررسي نشريه‌ها، گزارشات و سالنامه‌هاي آماري كشاورزي سال ۹۹-۹۸ و مصاحبه با كارشناسان هر شهرستان و از طريق شركت‌هاي مهندسين مشاور (به دليل تكميل بودن اطلاعات) مربوطه گردآوري شد.

نتايج و بحث

در جدول ۲ فهرست داده‌هاي اوليه در اين مطالعه ارائه شده است. عملکرد محصولات زراعي نشان داد كه ذرت علوفه‌اي با ۵۵ تن در مشهد بيشترين و جو با ۳۶ تن كمترين ميزان عملکرد را به خود اختصاص داده است. در بين محصولات مورد بررسي، چغندر قند با ميزان الكتريسيته مصرفي ۹۰۵۷ كيلوات- ساعت بيشترين و جو با مصرف ۲۴۹۲ كيلوات- ساعت در هكتار كمترين ميزان مصرف الكتريسيته را داشته است. بنا بر اين گندم، جو، يونجه و ذرت به لحاظ مصرف ساير نهاده‌ها (كود، سم) كمترين ميزان هزينه را به خود اختصاص داده‌اند.

در اين محدوده تعداد ۵ شهرستان وجود دارد كه يا به‌طور كامل و يا قسمتي از آن‌ها با محدوده مطالعاتي مشهد منطبق است. شهرستان‌هاي چناران تقريباً به‌طور كامل و ۴۷ درصد از شهرستان مشهد، قسمت‌هاي جزئي از ۷ درصد از شهرستان طرقبه- شانديز در اين محدوده مطالعاتي واقع هستند. منابع آب سطحی این محدوده شامل سدها، رودخانه‌ها، آبراهه‌ها و مسيل‌ها بوده كه عمدتاً داراي رژيم برفي باراني است. در حال حاضر جريانات دائم (پايه) اين رودخانه عمدتاً به شاخه اصلي رودخانه (كشف‌رود) نمي‌رسد و در اراضي آبخور واقع شده در حوضه آبريز همان رودخانه به مصرف كشاورزي رسيده و فقط جريانات سيلابي به شاخه اصلي رودخانه مي‌رسد. اين امر عمدتاً به دليل تغيير کاربري اراضي حاشيه رودخانه‌ها از كشت غلات به كشت باغات در طی ساليان گذشته است (Report in Kashfarud Basin, 2009).

شهرستان‌هاي مشهد، چناران و طرقبه- شانديز مهمترين شهرهاي واقع در محدوده مطالعاتي مشهد مي‌باشند. عمده محصولات زراعي كشت شده در اين مناطق شامل گندم، جو، چغندر قند، سيب‌زميني، پياز، گوجه‌فرنگي، خيار، ذرت علوفه‌اي و يونجه مي‌باشد كه در اين مطالعه مورد بررسي قرار گرفت. شايدان ذكر است، استان خراسان رضوي در توليد محصولات جو، خيار، گوجه‌فرنگي، پياز و

جدول ۲- فهرست داده‌های اولیه محصولات زراعی

Table 2- List of basic crop data

کشت Product	تولید کالری (کیلو) Calories (Kilo)	سم (کیلوگرم/ هکتار) Pesticides (Kg / ha)	کود مصرفی (کیلوگرم / هکتار) Fertilizer consumption (tons / ha)	عملکرد (تن / هکتار) Yeild (Ton/ ha)	نیاز ناخالص آبی (مترمکعب / هکتار) Gross water requirement (MCM / ha)	برق مصرفی (کیلووات - ساعت / هکتار) Electricity consumption (kw.h/ ha)
گندم Wheat	3500	1/391	392	4/2	6644	2969
جو Barley	3890	0/962	364	3/6	5577	2492
چغندر قند Sugar Beet	460	4/38	572	35	20266	9057
پیاز Onion	400	4/18	606	50	1511	6842
سیب زمینی Potato	770	3/64	706	35	19600	8759
گوجه فرنگی Tomato	180	2/97	641	40	18022	8054
یونجه Alfalfa	230	0/957	253	11	18511	8272
ذرت Maize	860	2/13	543	55	13600	6078
خیار Cucumber	120	4/18	456	25	13111	5859

منبع: سازمان جهاد کشاورزی خراسان رضوی، ۱۳۹۸-۱۳۹۹

Source: Khorasan Razavi Agricultural Jihad Organization, 2019-2020.

از جمله مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف کود و سم به میزان ۱۲۸۹۲ هکتار بود که معادل ۱۷ درصد افزایش می‌یابد. مجموع کل سطح زیرکشت در الگوی جاری در مشهد، چناران و طرهبه- شانندیز به ترتیب از ۳۴۳۹۰، ۲۹۴۴۶، از ۴۸۶۳۹ به ۲۶۰۲۷ و از ۱۷۰ هکتار به ۷۵ هکتار در الگوی چندهدفه با هدف حداکثرسازی سود خالص معادل ۴۱/۴ درصد افزایش، ۱۱/۶۱ درصد و ۵۵/۸ درصد کاهش را نشان داد. شایان ذکر است در شهرستان‌های مورد بررسی مجموع سطح زیرکشت در اهداف حداقل‌سازی انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف کود و حداقل مصرف آب‌آبیاری نسبت به حالت جاری کاهش و مقدار آن برای تمامی اهداف حداقل‌سازی کاهش یافته است.

بیشترین کاهش سطح زیرکشت در شهرستان چناران و طرهبه- شانندیز در الگوی چندهدفه در بین محصولات را گندم، جو، یونجه، ذرت، چغندر قند، گوجه‌فرنگی و سیب‌زمینی به خود اختصاص داده‌اند. کاهش سطح زیرکشت گندم در الگوی بهینه برای شهرستان‌های مشهد، چناران و طرهبه- شانندیز ۶۰ درصد نسبت به الگوی جاری

نتایج مدل برنامه‌ریزی غیرخطی پیشنهادی در محدوده مطالعاتی مشهد (شهرستان‌های مشهد، چناران و طرهبه- شانندیز) براساس اهداف چندگانه رویکرد همبست آب- غذا- انرژی برای محصولات مختلف زراعی در جدول ۳ ارائه شده است. اطلاعات جدول ۳ مبنی بر میزان تغییرات سطح زیر کشت چندهدفه محصولات زراعی نسبت به الگوی جاری محاسبه شده است. نتایج نشان داد میزان تغییر سطح زیرکشت چندهدفه نسبت به الگوی کشت جاری در مشهد، چناران و طرهبه- شانندیز به ترتیب ۲۵/۹۲، ۵۳/۰۵ و ۵۵/۸۸ درصد کاهش داشته است. همچنین سطح زیرکشت محصولات جو و ذرت در الگوی چندهدفه مشهد به ترتیب از ۱۱۰۰۰ به ۱۲۸۹۲ (معادل ۱۷ درصد) و از ۲۷۰۰ به ۳۱۰۱ هکتار (معادل ۱۵ درصد) نسبت به الگوی جاری افزایش یافته است. سطح زیرکشت محصول جو در هدف حداکثر سازی سود خالص برابر ۱۶۹۳۴ هکتار (معادل ۴۶/۷۱ درصد) افزایش بود. همچنین سطح زیرکشت محصول جو در مشهد با توجه به هدف حداقل‌سازی مصرف آب‌آبیاری از ۱۱۰۰۰ به ۱۰۸۷۷ هکتار معادل (معادل ۱/۱۱ درصد) کاهش یافته است و در سایر اهداف حداقل‌سازی

هكتار (معادل ۴۱/۱۷ درصد) براي طرقيه- شانديز بسيار مشهود بوده است. بنا بر اين مي‌توان نتيجه گرفت كه محصولاتي كه اثرات زيست‌محيطي بالايي دارند ميزان سطح زيركشت آنها در الكوي بهينه کاهش يافته است.

برآورد شده است. همچنين مجموع کاهش سطح زيركشت در الكوهاي حداقل‌سازي مصرف انرژي ۲۵۴۷۵ هكتار در مشهد (معادل ۲۶ درصد)، مصرف آب‌آبياري در چناران برابر ۱۵۹۵۴ هكتار (معادل ۴۶ درصد)، انتشار گازهاي گلخانه‌اي و مصرف كود و سم برابر ۱۰۰

جدول ۳- سطح زيركشت محصولات كشاورزي محدوده مطالعاتي مشهد (هكتار)
Table 3- Cultivation area of agricultural products in Mashhad-Chenaran plain (ha)

شهرها Cities	محصولات Products	جاري Current	حداكثرسازي سود خالص Max Profit	حداكثر توليد كاري Max Calories	حداقل انتشار گازهاي گلخانه‌اي Min greenhouse gas emissions	حداقل مصرف انرژي Min energy consumption	حداقل مصرف آب- آبياري Min water irrigation	حداقل مصرف سم و كود Min of pesticides and fertilizers	چندهدفه MOP	درصد تغييرات Percentage of changes
مشهد Mashhad	گندم Wheat	11500	16873	16873	4619	4619	4619	4619	4619	-60
	جو Barley	11000	16934	8484	12892	12892	10877	12892	12892	17
	چغندر قند Sugar Beet	560	687	687	333	333	333	333	333	-41
	پياز Onion	890	1106	1106	605	605	605	605	605	-32
	سيب زميني Potato	90	110	110	55	55	55	55	55	-39
	گوجه فرنگي Tomato	3100	3850	1689	1689	1689	1689	1689	1689	-46
	يونجه Alfalfa	3650	4716	1460	1460	1460	1460	1460	1460	-60
	ذرت Maize	2700	3259	3259	3101	3101	3101	1717	3101	15
	خيار Cucumber	900	1103	721	721	721	721	721	721	-20
	جمع Total	34390	48639	34390	25450	25475	23460	24092	25475	-25.92
چناران Chenaran	گندم Wheat	10700	13576	13064	4296	4296	4296	4296	4296	-60
	جو Barley	10200	4803	9442	4803	4803	6933	4803	4803	-53
	چغندر قند Sugar Beet	1825	2238	1706	1149	1149	1149	1149	1149	-37
	پياز Onion	251	310	310	174	174	174	174	174	-30
	سيب زميني Potato	230	281	281	143	143	143	143	143	-38
	گوجه فرنگي Tomato	2765	3416	1862	1862	1862	1862	1862	1862	-33
	يونجه Alfalfa	1730	692	692	692	692	692	692	692	-60
	ذرت Maize	1730	692	2076	692	692	692	2076	692	-60
	خيار Cucumber	15	19	12	12	12	12	12	12	-19
	جمع Total	29446	26027	29446	13823	13823	15954	15207	13823	-53.05
	گندم	54	67	22	22	22	22	22	22	-60

طرقه-شاندیز Torghabe- Shandiz	Wheat جو									
	Barley	61	26	47	26	26	26	47	26	-57
	پیاز Onion	8	10	6	6	6	6	6	6	-31
	سیب زمینی Potato	3	4	2	2	2	2	2	2	-42
	گوجه فرنگی Tomato	4	5	2	2	2	2	2	2	-41
	یونجه Alfalfa	5	2	2	2	2	2	2	2	-60
	ذرت Maize	30	12	36	36	12	12	36	12	-60
	خیار Cucumber	5	6	4	4	4	4	4	4	-18
	جمع Total	170	75	100	100	75	75	100	75	-55.88

ماخذ: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

گازهای گلخانه‌ای، مصرف کود-سم، مصرف انرژی و آب آبیاری (اهداف زیست‌محیطی) سطح زیرکشت برای محصولات گوجه‌فرنگی، پیاز، یونجه، خیار و چغندرقد در همه شهرها کاهش و در هدف حداکثرسازی سود (اهداف اقتصادی) سطح زیرکشت محصولات پیاز، سیب‌زمینی، خیار، گوجه‌فرنگی، چغندرقد و گندم در همه شهرها افزایش پیدا کرده است. همچنین نتایج نشان داد محصولاتی که به‌لحاظ اقتصادی و زیست‌محیطی، با اهداف متفاوت مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اگر چه از دیدگاه زیست‌محیطی (مصرف آب، انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف سم و کود) دارای محدودیت‌های برای کشت در شهرهای مشهد، چناران و طرقه-شاندیز می‌باشند، اما از نظر تولیدکالری (گندم، ذرت، پیاز، سیب‌زمینی، چغندرقد و گوجه‌فرنگی) و افزایش سود دارای مزیت اقتصادی برای کشاورزان مناطق می‌باشند. لذا، بایستی سطح زیرکشت محصولات کشاورزی که اثرات زیست‌محیطی بالایی دارند کاسته شده و یا با ملاحظات زیست‌محیطی بیشتری کشت شوند، در مقابل استراتژی افزایش تولید به سمت محصولاتی که اثرات زیست‌محیطی کمتر و جنبه اقتصادی بیشتری دارند تغییر داده شود.

با توجه به اینکه محصولات زراعی نقش تعیین‌کننده‌ای در امنیت‌غذایی جوامع به‌عهده دارند؛ بنابراین در آینده اراضی زراعی بیش از سایر منابع، محدود کننده تولید غذا در جهان خواهد بود (Karabulut et al., 2018). در نتیجه بهره‌برداری صحیح از آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Tichenor et al., 2017; Chiun and Hwong, 2020). لذا بکارگیری رویکرد همبست از طریق مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی علاوه بر توسعه اقتصادی در مدیریت بهینه منابع نقش مهمی دارد. بنابراین در شهرستان‌های محدوده

در مجموع بررسی کل سطح زیرکشت محصولات در جدول ۳ نشان داد که سطح زیرکشت مشهد با هدف حداکثرسازی سود از ۳۴۳۹۰ هکتار الگوی جاری به میزان ۴۸۶۳۹ هکتار افزایش یافت. همچنین مجموع سطح زیرکشت محصولات در چناران از ۲۹۴۴۶ هکتار در الگوی جاری به ۲۶۰۲۷ هکتار در هدف حداکثرسازی سود کاهش یافته است. در مقابل سطح زیرکشت مشهد و چناران با هدف حداکثرسازی تولید کالری برابر با الگوی جاری به ترتیب ۳۴۳۹۰ و ۲۹۴۴۶ بوده است. اما در طرقه-شاندیز سطح زیرکشت به میزان ۱۰۰ هکتار از ۱۷۰ هکتار با هدف حداکثرسازی تولید کالری و ۷۵ هکتار با هدف حداکثرسازی سود نسبت به الگوی جاری کاهش پیدا کرده است. بیشترین تغییر در سطح زیرکشت الگوی چندهدفه برای محصولات یونجه و گندم در مشهد به میزان ۶۰ درصد کاهش بود. سطح زیرکشت سیب‌زمینی در هدف حداکثرسازی سود خالص و حداکثرسازی تولید کالری برای مشهد (افزایش از ۹۰ هکتار الگوی جاری به ۱۱۰ هکتار الگوی چندهدفه)، چناران (افزایش از ۲۳۰ هکتار الگوی جاری به ۲۸۱ هکتار الگوی چندهدفه) و در طرقه-شاندیز از ۳ هکتار به ۲ هکتار کاهش یافته است. همچنین سطح زیرکشت پیاز در اهداف حداکثرسازی سود و کالری برای مشهد و چناران افزایش و در طرقه-شاندیز سطح زیرکشت آن در اهداف حداکثرسازی سود و کالری به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. بنابراین این امر بیانگر مزایای اقتصادی کشت این محصول می‌باشد. در مقابل سطح زیرکشت این محصول (پیاز) در اهداف حداقل‌سازی مصرف آب‌آبیاری، انرژی، انتشارگازهای گلخانه‌ای و مصرف کود و سم در کلیه مناطق نسبت به حالت جاری کاهش یافته است. بطور کلی کشت این محصول علاوه بر مزیت اقتصادی از جنبه زیست‌محیطی نیز مقرون به‌صرفه می‌باشد. شایان ذکر است که در هدف حداقل‌سازی انتشار

انتشار گازهاي گلخانه‌اي يا همان اثرات زيست‌محيطي و اجرائي الكوي كشت مناسب مي‌باشد، لذا کاهش اين متغير در الكوي بهينه دليلي بر توجيه اين مهم بوده است. به‌طور كلي با بكارگيري رويكرد همبست در انتخاب سطح زيركشت محدوده مطالعاتي مشهد، سطح زيركشت در الكوي بهينه از 64006 به 39873 هكتار (48/38 درصد) تقليل مي‌يابد، در راستاي تأمين امنيت‌غذائي جامعه مي‌توان از طريق كشت فراسرزميني يا تهيه طرح آميش سرزميني و اجرائي دقيق آن اقدام نمود. همچنين از طريق جايگزيني كشت محصولات با توجه به پتانسيل سازگاري آن‌ها و مصرف نهاده‌ها (آب، انرژي، كود و سم) با وضعيت منابع هر منطقه نياز جوامع را تأمين خواهد شد. از طرفي بايستي بخش‌ها و مناطق مناسب براي كشت محصولات خاص در استان خراسان رضوي شناسايي شود. در نهايت الكوهاي كشت بهينه بر مبناي محدوديت منابع آب، انرژي و سطح زيركشت تهيه و اجرا شود. مصرف آب‌آبياري از 807 به 598 ميليون متر مكعب (معادل 25 درصد)، انرژي از 2231 به 1046 هزار مگاوات- ساعت (معادل 53/11 درصد) و ميزان توليد كالري محصولات از 975/3 به 647/4 (معادل 33 درصد) ميليارد كالري کاهش مي‌يابد. به دليل اينكه مهمترين عامل محدود كننده در الكوي كشت منطقه‌اي نهاده آب‌آبياري مي‌باشد، و علت آن اثرپذيري زياد نتايج مدل بهينه نسبت به مدل حداقل سازي مصرف آب‌آبياري بوده است. شايدان ذكر است با بكارگيري همبست آب- غذا- انرژي، ميزان توليد كالري کاهش و سود ناخالص كشاورزان نيز در الكوي چند هدفه افزايش يافته است. بنابر اين با افزايش راندمان مصرف آب و کاهش فاصله عملكرد با مقدار مورد انتظار، مي‌توان سطح خودكفايي توليد غذا را به سطح قابل قبولي افزايش داد.

انتخاب الكوي كشت بدون كاربست سامانه آب- غذا- انرژي، تنها اهداف اقتصادي را مورد توجه و تاكيد قرار خواهد داد، اما بكارگيري اين رويكرد در بخش كشاورزي علاوه بر اهداف اقتصادي، اثرات زيست‌محيطي و روابط متقابل ميان منابع آب، غذا و انرژي نيز بصورت كمی تجزيه و تحليل مي‌شود. در مطالعه حاضر اثرات انتشار گازهاي گلخانه‌اي ناشي از مصرف نهاده‌ها (سم، كود، آب‌آبياري، الكتريسيته و سوخت ديزل)، هزينه‌هاي توليد و الكتريسيته مصرفي براي انتقال، پمپاژ آب، فراوري مواد غذايي نيز در بلندمدت کاهش مي‌يابد (جدول 4).

مطالعاتي مشهد (مشهد، چناران و طرقبه- شانديز) لازم است علاوه بر افزايش كالري حاصل از توليد محصول، براي به دست آوردن سود بيشتري و کاهش اثرات زيست‌محيطي، سطح زيركشت بيشتري را به كشت ذرت و جو اختصاص داد.

مرداني نجف‌آبادي و همكاران (Mardani Najafabadi et al., 2019)، مرزبان و همكاران (Marzban et al., 2020) و ويست (West, 2019) در راستاي برنامه‌ريزي براي كشت محصولات كشاورزي اهداف سود اقتصادي، کاهش هزينه‌ها و انتشار گازهاي گلخانه‌اي را در تعيين الكوي كشت محصولات بصورت تك‌بعدي مورد بررسي قرار دادند؛ در صورتي كه در مطالعه انجام شده با ديدگامي متفاوت از ساير پژوهش‌ها از طريق بكارگيري رويكرد همبست آب- غذا- انرژي با استفاده از مدل‌هاي چندهدفه مورد بررسي قرار داد.

بنابر اين با اجرائي برنامه پيشنهاده شده در اين مطالعه با رويكرد يکپارچه سه سامانه آب- غذا- انرژي، اثرات سوء استفاده از كود و سموم شيميايي بر آب، خاک و هوا، همچنين هزينه‌هاي مربوط به تهيه نهاده‌ها و مصرف نهاده‌هاي تجديديپذير و غيرقابل تجديد کاهش مي‌يابد و در بلندمدت اثرات مطلوبي بر بخش اقتصادي، زيست‌محيطي و مديريت منابع برجاى خواهد گذاشت. ثمره اين الكو، دستيابي به اهداف توسعه پايدار در بهره‌برداري بهينه از منابع و عوامل توليد بصورت مستمر و پايدار است.

برخي از متغيرهاي مهم و درصد تغييرات آن‌ها براي مدل سازي رياضي در راستاي همبست آب- غذا- انرژي در جدول 4 ارائه شده است. نتايج نشان داد سطح زيركشت براي محصولات زراعي مورد بررسي در محدوده مطالعاتي مشهد به دليل تغيير شرايط اقليمي منطقه و در پي برداشت بي‌رويه از منابع آب زيرزميني كه در نهايت اقل سفره آب زيرزميني را به دنبال داشته، 48/38 درصد کاهش يافته است. مقدار مصرف سم (37/9 درصد)، كود (38/3 درصد) و هزينه‌هاي توليد (60/8 درصد)، انتشار گازهاي گلخانه‌اي (40 درصد)، مصرف سوخت ديزل (38/4 درصد) و توليد كل (33 درصد) در الكوي چندهدفه براي محدوده مطالعاتي مشهد کاهش و سود خالص كشاورزان 49/3 درصد افزايش يافته است.

با توجه به اينكه يكي از سياست‌هاي مهم رويكرد همبست آب- غذا- انرژي در بهبود نقش اقتصادي بخش كشاورزي، کاهش

جدول ۴- متغیرهای مهم پیشنهادی محصولات زراعی در رویکرد همبست آب- غذا- انرژی

Table 4- Important variables proposed by crops in the water-food-energy correlation approach

متغیرها Variables		مشهد Mashhad	چناران Chenaran	طرقبه- شاندیز Torghabeh- Shandiz	جمع کل Total
سطح زیرکشت تخصیص یافته به محصولات زراعی در هر منطقه (هکتار) Crop area allocated to crops in each area (hectares)	جاری Current بهینه Optimal درصد تغییر Percentage change	34390	29446	170 75	64006 39873
مقدار انرژی تخصیص داده شده برای منابع در هر منطقه (هزار مگاوات. ساعت) The amount of energy allocated to resources in each area (Thousand MWh. Hours)	جاری Current بهینه Optimal درصد تغییر Percentage change	1485	742	4 3	2231 1046
مقدار مصرف کود (هزار تن) Fertilizer consumption (Thousand tons)	جاری Current بهینه Optimal درصد تغییر Percentage change	14.4	12	0.03 0.07	26.5 16.4
مقدار مصرف سم (هزار تن) Pesticides consumption (Thousand tons)	جاری Current بهینه Optimal درصد تغییر Percentage change	55.4	44.4	0.276 0.130	100 62.13
مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای (میلیون تن) Emission of greenhouse gases (million tons)	جاری Current بهینه Optimal درصد تغییر Percentage change	114.2	91.3	0.516 0.238	206 123.9
	درصد تغییر Percentage change	-29.6	-48.2	-53	-37.9
	درصد تغییر Percentage change	-31.8	-49	-53	-40

میزان تولید کالری از موادغذایی (میلیارد کالری در هکتار) Calories production from food (billion calories per hectare)	جاری Current	524	448	3.3	975.3
	بهینه Optimal	439	207	1.4	647.3
	درصد تغییر Percentage change	-16.2	-53	-57.7	-33.6
آب‌آبیاری در هر منطقه (میلیون متر مکعب) Irrigation water in each area (million cubic meters)	جاری Current	442.8	362.7	2	807.5
	بهینه Optimal	363.3	234	1.3	598.6
	درصد تغییر Percentage change	-18	-35.4	-35	-25.8
سوخت مصرفی دیزل (هزار لیتر) Diesel fuel consumption (thousand liters)	جاری Current	1031	883.4	5	1919.4
	بهینه Optimal	764.3	417.4	2.3	1181.3
	درصد تغییر Percentage change	-26	-53	-54	-38.4
هزینه تولید کل (میلیارد ریال) Total production cost (Milyard Rials)	جاری Current	5786	4776	26	10588
	بهینه Optimal	2534	1607	8	4149
	درصد تغییر Percentage change	-56.2	-66.3	-69.2	-60.8
سود ناخالص کل (میلیارد ریال) Gross total profit (Milyard Rials)	جاری Current	1377	1305.5	6	2685.7
	بهینه Optimal	2339	1664.2	7.7	4011
	درصد تغییر Percentage change	69	27.5	28	49.3
تولید کل (هزار تن) Total production (thousand tons)	جاری Current	947.2	229.8	2.3	919.7
	بهینه Optimal	385.8	229.8	1.4	617
	درصد تغییر Percentage change	-22.4	-45.4	-39	-33

ماخذ: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

شده ۵۳ درصد، مصرف کود و سم ۳۸ درصد، مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای ۴۰ درصد، آب‌آبیاری ۲۵ درصد کاهش یافته و سود ناخالص به میزان ۴۹ درصد افزایش می‌یابد. در این راستا با توجه به کاهش

نتایج حاصل از جدول ۴ نشان داد با بکارگیری همبست آب- غذا- انرژي سطح زیرکشت تخصیص یافته به محصولات زراعي در محدوده مطالعاتی مشهود برابر ۳۸ درصد، میزان انرژي تخصیص داده

و مسائل اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی در ارائه سیاست‌گذاری‌های توسعه و مدیریت منابع استفاده شود.

در راستای نتایج حاصل از مطالعه پیشنهادات زیر ارائه شده است: نتایج مدل‌سازی رویکرد همبست آب-غذا-انرژی نشان داد، با بکارگیری رویکرد همبست آب-غذا-انرژی، سطح زیرکشت محدوده مطالعاتی ۳۸/۴۸ درصد، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ۴۰ درصد، آب‌آیاری ۲۵/۸ درصد و انرژی مصرفی ۵۳/۱۱ درصد کاهش یافت. بنابراین در راستای اجراء سیاست‌های توسعه و تعادل‌زیستی بکارگیری رویکرد همبست آب-غذا-انرژی در راستای حفاظت از محیط‌زیست و مدیریت منابع پیشنهاد می‌شود.

با توجه به کاهش سطح زیرکشت محصولات گندم، یونجه، گوجه‌فرنگی، چغندرقد، پیاز و خیار در الگوی چندهدفه برای تأمین امنیت‌غذایی جامعه می‌توان از طریق کشت فراسرزیمینی یا تهیه طرح آمایش سرزمین و اجرای دقیق آن گام برداشت. راهکارهایی از جمله جایگزینی کشت محصولات با توجه به پتانسیل سازگاری آن‌ها و مصرف نهاده‌ها (آب، انرژی، کود و سم) متناسب با وضعیت منابع هر منطقه، شناسایی بخش‌ها و مناطق مناسب برای کشت محصولات خاص در هر منطقه، در نهایت الگوهای کشت بهینه بر مبنای محدودیت منابع آب، انرژی و امنیت غذایی اجرا شود.

به دلیل اینکه در رویکرد همبست آب-غذا-انرژی همه اجزاء مختلف اقتصادی، اجتماعی، فنی و زیست‌محیطی ادغام و در ارتباط با هم مدنظر قرار می‌گیرند، بنابراین استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه در این امر بسیار حائز اهمیت است. پیشنهاد می‌شود که از سایر الگوریتم‌های حل مسایل چند هدفه مانند الگوریتم‌های فراابتکاری در مطالعات آینده استفاده شود.

از دیگر نتایج مطالعه افزایش سطح زیرکشت ذرت و جو در مشهد در الگوی برنامه‌ریزی چندهدفه بود. با توجه به اینکه سطح زیرکشت این محصولات در هدف حداقل‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای افزایش یافته است، بنابراین توصیه می‌شود با تغییراتی در الگوی کشت فعلی این محصولات استراتژی به سمت تولید محصولاتی با اثرات کمتر بر محیط‌زیست از جمله گندم، یونجه و پیاز تغییر داده شود. در این صورت علاوه بر افزایش سود ناخالص کشاورزان در عین حال از آسیب‌ها و پیامدهای مخرب زیست‌محیطی جلوگیری خواهد شد.

سطح زیرکشت محصولات در رویکرد همبست، توسعه کشت ارگانیک، همچنین توسعه کشت محصولات گلخانه‌ای جهت افزایش عملکرد، افزایش کالری حاصل از تولید محصول، جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای، مدیریت آب، انرژی و شناسایی مناطق مناسب برای کشت برخی از محصولات زراعی با هدف تأمین امنیت غذایی و جلوگیری از مصرف بیش از حد کود و سم شیمیایی در راستای اهداف محیط‌زیست توصیه می‌شود. به بیان دیگر برای دستیابی به اهداف کسب حداکثر سود و حداقل اثرات زیست‌محیطی بایستی سطح زیرکشت گندم، گوجه‌فرنگی، خیار، پیاز، سیب‌زمینی و چغندرقد افزایش یابد. بنابراین با اجرای الگوی بهینه همبست آب-غذا-انرژی در محدوده مطالعاتی مشهد در مجموع انتشار گازهای گلخانه‌ای از ۲۰۶ به ۱۲۳/۹ میلیون تن معادل ۴۰ درصد به محیط‌زیست کاسته شده است.

با لحاظ کردن و اجرای الگوی بهینه همبست آب-غذا-انرژی محاسبه شده در این مطالعه به کشاورزان این امکان را می‌دهد که همزمان با حفظ درآمد اقتصادی، ملاحظات زیست‌محیطی، مصرف بهینه و پایدار منابع (آب-غذا-انرژی) را برای انتخاب و اجرای سیاست‌ها مورد توجه قرار دهند. توجه به سیاست‌گذاری مستقل در هر کدام از سامانه‌های آب-غذا-انرژی و محیط‌زیست خطا بوده و تبعات جدی برای جوامع جهانی به دنبال خواهد داشت. تنها زمانی یک سیاست پایدار خواهد بود که بتواند در چارچوب تلفیقی آب-غذا-انرژی و محیط‌زیست بنا نهاده شود. بطور کلی در رویکرد تک‌بعدی به دلیل عدم انسجام سیاسی و پایین بودن بهره‌وری در استفاده از منابع، سبب ایجاد و پررنگ‌تر شدن رویکرد همبست شده است، و به کمک رویکرد همبست می‌توان امنیت همه جانبه منابع آب-انرژی-غذا را که توأم با دسترسی پایدار و عادلانه به منابع است را ارتقا بخشید. لذا برای جلوگیری از ارائه و اجرای سیاست‌های نامناسب تک‌بعدی، رویکرد همبست که کلیه ابعاد و عوامل موثر بر توسعه پایدار را بصورت سیستمی و با چارچوبی جامع و گسترده در برگیرد مفید خواهد بود. با نظر داشتن اینکه منشأ عمده چالش‌های جهانی و ملی، ناکارآمدی و ناهمگرایی سه سامانه آب-غذا-انرژی شناخته شده است، بنابراین بنیان سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی توسعه پایدار در تلفیق و یکپارچه‌سازی این سه سامانه می‌باشد. در این راستا پیشنهاد می‌شود از رویکرد همبست بعنوان راه‌حل جدید و مؤثر برای مواجهه با مشکلات

منابع

1. Agricultural Jihad Organization. (2020). Unpublished result, Khorasan Razavi.
2. Azamirad, M., Ghahreman, B., & Esmaili, K. (2018). Investigation flooding potential in the Kashafrud watershed, Mashhad the method SCS and GIS. *Journal of Watershed Management Research* 9(17): 26-38. (In Persian with English abstract)
3. Bagheri, A. (2018). *Water resources management with water, energy and food linkage approach*. The first international conference on water consumption management, demand and efficiency. (In Persian with English abstract)

abstract)

4. Buysse, J., Van Huylenbroeck, G., & Lauwers, L. (2007). Normative, Positive and Econometric Mathematical Programming as Tools for Incorporation of Multifunctionality in Agricultural Policy Modelling. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 120: 70-81. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.03.035>.
5. Chai, J., Shi H., Lu Q., & Hu, Y. (2020). Quantifying and predicting the Water-Energy-Food-Economy-Society-Environment Nexus based on Bayesian networks - A case study of China. *Journal of Cleaner Production*, 256: 120266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120266>
6. Chiun, L.P., & Hwong, W. (2020). Evaluating the environmental impacts of the water-energy-food nexus with a life-cycle approach. *Resources, Conservation and Recycling* 157: 104789. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104789>.
7. Davari, K., Shahedi, M., Talebi, F., Khazaei, S., Omranian, H., Fakhar, M., & Majidi, N. (2016). *Water book of Khorasan Razavi province*, Hedro Tak Tuse Mashhad.
8. Emamzadeh, S.M., Forghani, M.A., Karnema, A., & Darbandi S. (2016). Determining an optimum pattern of mixed planting from organic and non-organic crops with regard to economic and environmental indicators: A case study of cucumber in Kerman, Iran. *Information Processing in Agriculture* 3(4): 207-214. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.08.001>.
9. Esteve, P., Varela-Ortega, C., Blanco-Gutiérrez, I., & Downing, T.E. (2015). A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. *Ecological Economics* 120: 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.09.017>.
10. Esmaeilzadeh, S., Asgharipour, M.R., & Khoshnevisan, B. (2020). Water footprint and life cycle assessment of edible onion production-A case study in Iran. *Scientia Horticulturae* 261: 108925. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.08.001>.
11. Eslami, Z., Janatrostami, S., & Ashrafzadeh, A. (2019). Application of modeling in management of water, energy, and food Nexus, *Journal of Water and Sustainable Development* 6(2): 1-8. (In Persian with English abstract)
12. Fabiani, S., Vanino, S., Napoli, R., & Nino, P. (2020). Water energy food nexus approach for sustainability assessment at farm level: An experience from an intensive agricultural area in central Italy. *Environmental Science & Policy* 104: 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.10.008>.
13. Hoff, H. (2011). Understanding the NEXUS. Background paper for the Bonn, nexus conference: The water, energy and food security nexus solutions for the green economy. Stockholm Environment Institute, Stockholm.
14. Kalbali, E., Ziaee, S., Mardani Najafabadi, M., & Zakerinia, M. (2021). Approaches to adapting to -impacts of climate change in northern Iran: The application of a Hydrogy-Economics model. *Journal of Cleaner Production* 280: Part 1, 124067. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124067>.
15. Karabulut, A.A., Crenna, E., Sala, S., & Udias, A. (2018). A proposal for integration of the ecosystem-water-food-land-energy (EWFLE) nexus concept into life cycle assessment: A synthesis matrix system for food security. *Journal of Cleaner Production* 172: 3874-3889. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.092>.
16. Keyhanpour, M.J., Mousavi-Jahromi, S.H., & Ebrahimi, H. (2021). Dynamic analysis of sustainable water resources management based on water-food-energy Nexus case study: Khuzestan province, *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 3(15): 567-581. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1001.1.20087942.1400.15.3.8.2>.
17. Mardani Najafabadi, M., Ziaee, S., Nikouei, A., & Borazjani, M.A. 2019. Mathematical programming model (MMP) for optimization of regional cropping patterns decisions: A case study. *Agricultural Systems*, 173: 218-232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.02.006>
18. Mirabi, M., & Krabi, M. (2019). *Integrated modeling in the optimal management of water, energy and food resources with a correlated approach*, 11th National Congress of Civil Engineering, Shiraz. (In Persian with English abstract)
19. Mo, li., Qiang, F., Vijay, P.S., Yi, j., Dong, L., Chenglong, Z., & Tianxiao, L. (2019). An optimal modelling approach for managing agricultural water-energy-food nexus under uncertainty. *Science of the Total Environment* 651: 1416-1434. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.291>.
20. Monem, M.J., Delavar, M., & Hosseini, S.M. (2019). Application and evaluation of water, food and energy (NEXUS) in irrigation Networks management: case study of Zayandehrud irrigation Network, *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 1(14): 275-285. (In Persian with English abstract)
21. Marzban, Z., Asgharepour, M.R., Ghanbari, A., Nikouei, A.R., Ramroudi, M., & Seyed Abadi, E. (2020). Reducing environmental effects by redesigning the cultivation pattern with the approach of using cycle assessment Life and Multipurpose Planning (Case Study: East of Lorestan Province), *Scientific knowledge of Agricultural Knowledge and Sustainable Production* 30(3): 311-330. (In Persian with English abstract)
22. Nie, Y., Avraamidou, S., Xiaoa, X., Efstathiou, N. P., Jie, L., Yujiao, Z., Fei, S., Jie, Y., & Min, Z. (2019). A Food-Energy-Water Nexus approach for land use optimization. *Science of the Total Environment* 659: 7-19. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.242>.
23. Pu, R.Y., Sang-Hyun, L., Jin, Y.C., Seung-Hwan, Y., & Seung-Oh, H. (2022). Analysis of climate change impact on resource intensity and carbon emissions in protected farming systems using Water-Energy-Food-Carbon Nexus, *Resources, Conservation & Recycling* 184: 106394. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106394>.

24. Qin, J., Duan, W., Chen, Y., Dukhovny, V.A., Sorokin, D., Li, Y., & Wang, X. (2022). Comprehensive evaluation and sustainable development of water–energy–food–ecology systems in Central Asia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 157: 112061. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112061>.
25. Report on integrated management of water resources in Kashfarud Basin. 2009.
26. Sharifi Moghadam, E., & Sadeghi, S.H.R. (2018). Application of Water-Energy-Food Correlation in Water Resources Management, the First National Conference on Water Resources Management Strategies and Environmental Challenges. (In Persian with English abstract)
27. Safaei, V., Pourmohammad, Y., & Davari, K. (2020). Interconnected Approach to Water, Energy and Food in Water Resources Management (Case Study: Mashhad Area), *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 5(14): 1721-1708. (In Persian with English abstract)
28. Safavi, A., & Ehteshami, M. (2022). Modeling the correlation approach of water, energy and food and evaluating its social and environmental sustainability (Case study: Varamin city). *Scientific Journal of Hydroelectric Dam and Power Plant* 8(28): 101-80. (In Persian with English abstract)
29. Tichenor, N.E., Van Zanten, H.H., de Boer, I.J., Peters, C.J., Carthy, A.C., & Griffin T.S. (2017). Land use efficiency of beef systems in the Northeastern USA from a food supply perspective. *Agricultural Systems* 156: 34-42. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.05.011>.
30. Wicaksono, A., & Kang D. (2019). Nationwide simulation of water, energy, and food nexus: Case study in South Korea and Indonesia. *Journal of Hydro-environment Research* 22: 70-87. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2018.10.003>.
31. West, J. (2019). Multi-criteria evolutionary algorithm optimization for horticulture crop management. *Agricultural Systems* 173: 469-481. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.03.016>.
32. Yu, L., Xiao, Y., Zeng, X.T., Li, Y.P., Fan, Y.R. (2020). Planning water-energy-food nexus system management under multi-level and uncertainty. *Journal of Cleaner Production* 251: 119658. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119658>.
33. Zhang, X., & Vesselinov, V.V. (2018). Integrated modeling approach for optimal management of water, energy and food security nexus. *Advances in Water Resources* 101: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2017.10.002>.

