جایگاه همبست آب–خاک–غذا–انرژی در ایران

فاطمه رزاقی*

۱- بخش مهندسی آب و مرکز مطالعات خشکسالی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مقاله (razzaghi@shirazu.ac.ir)

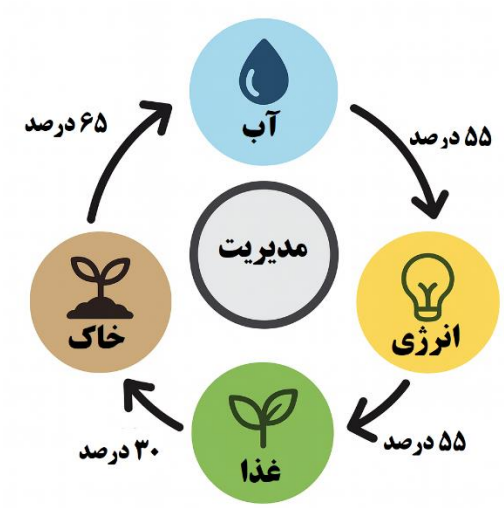
چکیده

افزایش فشار بر منابع محدود آب، خاک، غذا و انرژی و پیامدهای ناشی از تغییرات اقلیمی، اهمیت رویکردهای مدیریتی یکپارچه را بیش از پیش برجسته کرده است. پیوستگی این منابع در قالب همبست آب-خاک-غذا-انرژی نشان می‌دهد که اتخاذ تصمیم در هر بخش، پیامدهای مستقیمی بر سایر اجزا دارد و ازاین‌رو، مدیریت نقش محوری در هدایت کارآمد این تعاملات ایفا می‌کند. به‌کارگیری سیاست‌های هماهنگ، ابزارهای مدل‌سازی سیستمی، فناوری‌های پاک و سبز و تقویت ساختارهای نهادی از جمله اقداماتی است که می‌تواند بهره‌وری منابع را بهبود بخشد و فشار زیست‌محیطی را کاهش دهد. در این مقاله، ضمن مرور تجربه جهانی، شرایط ایران نیز در چارچوب همبست تحلیل شده و نشان داده می‌شود که مدیریت هدفمند و هماهنگ، عامل کلیدی در افزایش تاب‌آوری سامانه‌های تولید، ارتقای امنیت غذایی و انرژی و دستیابی به توسعه پایدار است. مرور مطالعات انجام‌شده در کشور بیانگر آن است که رویکردهای مدیریتی مبتنی بر تحلیل همبست می‌توانند تصمیم‌گیری در شرایط کم‌آبی، تنش انرژی و تخریب خاک را بهبود دهند و مسیر توسعه را در مناطق آسیب‌پذیر هدایت کنند.

واژگان کلیدی: تاب‌آوری، توسعه پایدار، فناوری‌های پاک، فناوری‌های سبز، همبست

مقدمه

تحولات سریع جمعیتی، تغییرات اقلیمی، رشد تقاضای جهانی برای غذا و انرژی و محدودیت منابع پایه، موجب شده است که مدیریت منابع طبیعی به یکی از چالش‌های مهم قرن حاضر تبدیل شود. در چنین شرایطی، وابستگی تنگاتنگ میان منابع آب، خاک، غذا و انرژی بیش از گذشته آشکار شده و نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری‌های بخشی نمی‌تواند پاسخگوی پیچیدگی‌های موجود باشد. رویکرد همبست آب-خاک-غذا-انرژی به‌عنوان چارچوبی تحلیلی و مدیریتی توسعه یافته است تا این تعاملات را در بستری یکپارچه بررسی کند و تصویری واقع‌گرایانه از پیامدهای تصمیمات مدیریتی ارائه دهد (شکل ۱). در این میان، نقش مدیریت به‌عنوان محور شکل‌دهنده روابط میان منابع، نقشی تعیین‌کننده است؛ زیرا مدیریت ناکارآمد در یک حوزه می‌تواند سبب ایجاد بحران در سایر حوزه‌ها شود، درحالی‌که مدیریت یکپارچه می‌تواند پایداری کل سیستم را تضمین کند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بدون یک چارچوب مدیریتی مؤثر، تلاش‌ها برای بهبود بهره‌وری آب یا خاک، امنیت غذایی یا مصرف انرژی اغلب ناکارآمد و کوتاه‌مدت خواهد بود (Bazilian et al., 2011). مدیریت یکپارچه منابع با رویکرد چندبخشی و سیاست‌گذاری هماهنگ، امکان پیش‌بینی و تحلیل اثرات سناریوهای مختلف را فراهم می‌کند و در نتیجه، پایدارسازی منابع و کاهش فشار بر محیط‌زیست را تضمین می‌نماید (Rasul, 2016).



شکل ۱- همبست آب-خاک-غذا-انرژی

مطالعات جهانی تأکید دارند که مدیریت مبتنی بر همبست، شرط لازم برای حفظ تعادل منابع، افزایش بهره‌وری و کاهش اثرات زیست‌محیطی است (Amiraslani and Dragovich, 2023; Zarei et al., 2020). سیاست‌گذاری هماهنگ، بهره‌گیری از مدل‌های سیستمی، استفاده از فناوری‌های پاک و سبز، و توسعه سازوکارهای میان‌بخشی از مهم‌ترین ارکان این نوع مدیریت به‌شمار می‌روند. در ایران نیز مجموعه‌ای از چالش‌ها از جمله کمبود آب، افت آبخوان‌ها، فرسایش خاک، وابستگی تولید به انرژی یارانه‌ای، اتلاف تولیدات کشاورزی و ضعف ساختارهای نهادی، ضرورت بهره‌گیری از مدیریت یکپارچه در چارچوب همبست را دوچندان کرده است. پژوهش‌هایی که در سیستان، دشت اردبیل و حوضه دریاچه ارومیه انجام شده‌اند، نشان می‌دهند که تحلیل همبست و مدیریت مبتنی بر آن می‌تواند راهی عملی برای کاهش مصرف آب، افزایش بهره‌وری انرژی، بهبود عملکرد کشاورزی و سازگاری با تغییرات اقلیمی فراهم آورد (Badih Barzin et al., 2024; Nasrollahi et al., 2021).

به‌علاوه، تقویت تاب‌آوری سامانه‌های تولید و بهره‌گیری از فناوری‌های پاک و سبز به‌عنوان اجزای جدانشدنی مدیریت نوین منابع، نقش مهمی در کاهش آسیب‌پذیری و پایداری تولید در واحد سطح دارند. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، سامانه‌های هوشمند پایش آب و خاک، کشاورزی دقیق و روش‌های مدیریت محافظه‌کارانه آب و خاک، نمونه‌هایی از این فناوری‌ها هستند که در بسیاری از کشورها به‌کار گرفته شده و آثار قابل توجهی در پایداری منابع داشته‌اند (Radmehr et al., 2024).

بنابراین، نقش مدیریتی همبست، نه‌تنها به هماهنگ‌سازی تصمیمات میان بخش‌های مختلف محدود نمی‌شود، بلکه شامل هدایت منابع به‌سمت پایداری، تاب‌آوری، بهره‌وری بالا و کاهش اثرات متقابل منفی نیز هست. هدف این مقاله، تبیین جایگاه همبست آب-خاک-غذا-انرژی در ایران با تأکید ویژه بر شرایط ایران است.

چارچوب مفهومی همبست آب-خاک-غذا-انرژی

همبست، نشان‌دهنده رابطه متقابل میان منابع و پیامدهای تصمیم‌گیری در یک بخش بر سایر بخش‌هاست. بهره‌برداری بیش از حد از آب زیرزمینی برای کشاورزی نه‌تنها ذخایر آبی را کاهش می‌دهد، بلکه با افزایش عمق آبخوان‌ها، مصرف انرژی برای پمپاژ را نیز بالا می‌برد. از سوی دیگر، فرسایش خاک و کاهش کربن آلی، تولید در واحد سطح محصولات را کاهش می‌دهد و فشار بیشتری بر منابع آب و زمین وارد می‌کند (Farmandeh et al., 2025).

رویکرد همبست به مدیران امکان می‌دهد اثرات متقابل تصمیمات را پیش‌بینی کنند و سیاست‌های جامع و میان‌بخشی تدوین کنند. این چارچوب نه تنها بر بهره‌وری منابع تأکید دارد، بلکه بر کاهش فشار زیست‌محیطی و ارتقای پایداری سیستم‌های غذایی و انرژی نیز تمرکز می‌کند (زندپارسا و سپاسخواه، ۱۴۰۳).

همبست آب-خاک-غذا-انرژی در سطح جهانی

در سطح جهانی، مدیریت در چارچوب همبست آب-خاک-غذا-انرژی اهمیت بالایی دارد. سیاست‌گذاری یکپارچه و بین‌بخشی از ضروریات اساسی است، زیرا تصمیمات جزیره‌ای می‌توانند منجر به تعارض منابع و اتلاف انرژی شوند. نهادهای بین‌المللی مانند سازمان ملل، بانک جهانی و برنامه محیط زیست جهانی، مدل‌های تحلیلی و ابزارهایی برای مدیریت همبست ارائه کرده‌اند که شامل تحلیل سناریو، برنامه‌ریزی چندهدفه و مدل‌های سیستم دینامیکی است.

مدیریت منابع با بهینه‌سازی مصرف آب، انرژی، خاک، کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش تولید غذا همراه است. فناوری‌های نوین مانند سیستم‌های کنترل هوشمند آبیاری، حسگرهای خاک، پایش دیجیتال منابع و سیستم‌های تصمیم‌گیری هوشمند، بهره‌وری منابع را افزایش می‌دهند (Parra-López et al., 2025; Radmehr et al., 2024). همچنین، تقویت ظرفیت نهادی و همکاری بین بخشی میان وزارتخانه‌ها، شهرداری‌ها، بخش خصوصی و جوامع محلی برای اجرای سیاست‌های همبست ضروری است. پایش و ارزیابی نیز به مدیران امکان می‌دهد تا سیاست‌ها را اصلاح کنند و عملکرد منابع را بهینه نمایند.

مطالعات جهانی نشان می‌دهند که ترکیب مدل‌های تصمیم‌گیری با فناوری‌های نوین و سیاست‌گذاری یکپارچه، می‌تواند مصرف آب و انرژی را کاهش دهد، تولید غذا را افزایش دهد و پایداری محیط زیست را تضمین کند. این رویکرد، الگویی برای کشورهای در حال توسعه و دارای منابع محدود ارائه می‌دهد (Kheirinejad et al., 2024).

همبست آب-خاک-غذا-انرژی در ایران

رشد سریع جمعیت در ایران نشان می دهدکه از ۳۵ میلیون نفر در سال ۱۳۵۷ به ۸۶ میلیون نفر در سال ۱۳۹۸ افزایش یافت و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۱۴۲۸ به ۱۰۰ میلیون نفر برسد. علاوه بر این، پیش بینی‌ها نشان می‌دهد که کمبود آب در کشور باعث کاهش سرانه آب از ۴۸۰۰ لیتر (سال ۱۳۰۷) به ۷۰۰ لیتر (سال ۱۴۲۸) شود (Norouzi and Kalantari, 2020) . همه این افزایش‌ها و کاهش‌ها باعث شده است که سیستم اقلیمی در ایران بهره‌وری خود را از دست بدهد و با ویژگی‌های خاص اقلیمی و منابع محدود، نمونه بارزی برای نیاز به تحلیل همبست آب-خاک-غذا-انرژی باشد. فشار شدید بر منابع آب و انرژی، فرسایش و کاهش حاصلخیزی خاک، و تغییرات اقلیمی، مدیریت مؤثر منابع را ضروری کرده‌اند (Rodell et a., 2018; Madani, 2014; Karimi et a., 2020). کمبود آب، مصرف بالای انرژی برای پمپاژ آب، استفاده ناپایدار از خاک، وابستگی کشاورزی به انرژی یارانه‌ای و ضعف ساختارهای نهادی و پراکندگی تصمیمات چالش‌های اصلی ایران هستند (حسین زاد و سرباز، ۱۴۰۲ ;Borgomeo et al., 2018).

مطالعات موردی در ایران نشان می‌دهند که بهره‌گیری از مدل‌های چندهدفه می‌تواند به تصمیم‌گیری بهتر و افزایش بهره‌وری منابع کمک کند. در سیستان، برنامه‌ریزی چندهدفه منابع کشاورزی با رویکرد همبست آب-انرژی-غذا اجرا شده است که اهدافی

چون حداکثرسازی درآمد کشاورزان، افزایش تولید کالری غذایی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش مصرف آب و انرژی را به‌طور هم‌زمان مدنظر قرار می‌دهد (Badih Barzin et al., 2024). Javan و همکاران (۲۰۲۳) در دشت اردبیل محصول مناسب با توجه به شرایط تغییر اقلیم آینده را بررسی کردند این مطالعه از چارچوب جدیدی از مدل پویایی سیستم و روش میانگین وزنی ترکیبی برای ارزیابی همبست آب-انرژی-غذا و پایداری منابع در دشت اردبیل تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم استفاده نمود. نتایج نشان داد که جو بهترین محصول برای کشت در این دشت است. با توجه به سناریو های اقلیمی که تعرف کردند نشان دادند که کاهش سطح آب زیرزمینی، افزایش مصرف انرژی و کمبود جریان سطحی آب می‌تواند در آینده تهدید جدی برای پایداری آب و کشاورزی در دشت اردبیل باشد. Kheirinejad و همکاران (۲۰۲۴) از مدل ترکیبی برای ارزیابی اثر تغییر الگوهای غذایی مردم بر مصرف آب، انرژی، زمین و امنیت غذایی استفاده کردند. نتایج نشان داد که رژیم غذایی کم گوشت باعث کاهش مصرف آب به میزان۱۰ تا ۲۵ درصد، انرژی به میزان ۵ تا ۱۵ و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای به میزان ۲۵ تا ۴۰٪ می‌شود. همچنین، نشان دادند که مدل های ترکیبی می تواند برای سیاستگذاری های ملی سودمند باشد. در مقاله‌ای Norouzi و Kalantari (۲۰۲۰)، یک مدل حکمرانی چندلایه را برای مدیریت همبست در ایران بررسی کردند. نتایج نشان دادند که دلیل اصلی مشکلات ایران در مدیریت آب و غذا، کمبودهای حکمرانی است. در نهایت، توصیه اصلی مدل حکمرانی برای ایران، بهبود همکاری بین تصمیم‌گیرندگان و مجریان در مدیریت آب، غذا و انرژی بود. همکاری شکننده و محدود بین سازمان‌ها و بخش‌هایی از دولت و بخش خصوصی در ایران، گلوگاه رویکرد همبست و اجرای آن برای مشکلات آب و غذای ایران است.

لازم است سیاست‌گذاری در زمینه مدیریت مصرف آب و انرژی (مثل بهبود راندمان آبیاری، کنترل برداشت غیرمجاز از آب زیرزمینی) صورت گیرد. تاب‌آوری سامانه‌های کشاورزی ایران با اقداماتی مانند تنوع‌بخشی کشت، احیای خاک، دیجیتالی‌سازی مدیریت مزرعه و افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (Radmehr et al., 2024). همچنین، توسعه انرژی‌های خورشیدی در چاه‌های کشاورزی، استفاده از سنسورهای هوشمند خاک، و گسترش سیستم‌های آبیاری بارانی کم‌فشار می‌تواند مصرف انرژی و آب را کاهش دهد (Kheirinejad et al., 2024; Gupta et a., 2025)

مدیریت همبست در ایران نیازمند تقویت ساختار نهادی، همکاری بین‌بخشی استفاده از فناوری‌های نوین، ایجاد سیستم‌های پایش و شاخص‌گذاری و ارائه سیاست‌های مشوق برای کشاورزان و بخش خصوصی است. این اقدامات می‌توانند امنیت غذایی را افزایش دهند، مصرف آب و انرژی را کاهش دهند و فشار بر خاک را کاهش دهند. جوامع محلی نیز به دلیل آشنایی عمیق با شرایط محیطی، مشارکت اجتماعی، و نقش مؤثر در اجرای پروژه‌ها و سیاست‌ها، از مهم‌ترین ارکان رویکرد همبست هستند (Samadi-Foroushani et al., 2022; Norouzi and Kalantari, 2020). همچنین، دانشمندان و محققان دانشگاهی نه تنها از طریق مدل‌سازی و تولید شاخص‌های علمی برای ارزیابی و پایش همبست می‌توانند مؤثر باشند، بلکه با آموزش و تربیت نسل جدید کارشناسان، مدیران و تصمیم‌گیرندگان آگاه زمینه را برای حکمرانی پایدار، مدیریت هوشمندانه و بهره‌وری بلندمدت منابع فراهم می‌کنند (Mooren et al., 2025).

نتیجه‌گیری

مفهوم همبست آب-خاک-غذا-انرژی چارچوبی اساسی برای مدیریت منابع محدود در جهان و ایران است. مدیریت مؤثر می‌تواند با سیاست‌گذاری یکپارچه، مدل‌سازی سیستمی ، بهینه‌سازی منابع، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و تقویت ساختارهای نهادی، بهره‌وری منابع را افزایش دهد و پایداری محیط زیست و امنیت غذایی را تضمین کند. در ایران، مطالعات موردی نشان داده‌اند که استفاده از مدل‌های چندهدفه، ابزارهای تصمیم‌گیری هوشمند و پایش منابع، راهکار مناسبی برای مواجهه با چالش‌های محدودیت منابع، کمبود آب، فشار انرژی و تخریب خاک است. ایجاد ساختارهای نهادی مشترک و سیاست‌های مشوق برای کشاورزان و بخش خصوصی، افزایش بهره‌وری منابع و کاهش فشار زیست‌محیطی را ممکن می‌سازد.

فهرست منابع

حسین زاد، ج.، سرباز، آ. (۱۴۰۲). تأثیر کاهش یارانه حامل‌های انرژی بر میزان استخراج منابع آب‌زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت شبستر از حوزه دریاچه ارومیه). دانش آب و خاک, ۳۳(۱), ۱۰۹-۱۲۷.

زندپارسا، ش، سپاسخواه، ع.ا. (۱۴۰۳). چارچوب رویکرد همبست آب–انرژی–غذا برای امنیت منابع طبیعی. مجله پژوهش های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی, ۹(۲), ۱۱۷-۱۳۰.

Amiraslani, F., Dragovich, D. (2023). Food-energy-water nexus in Iran over the last two centuries: A food secure future? Energy Nexus, 10:100189.

Badih Barzin, H., Hoseini, S. M., Hashemitabar, M., Mardani Najafabadi, M. (2024). The allocation of crop production resources in the southeast of Iran: the application of the water-energy-food nexus approach. Frontiers in Environmental Science, 12, 1349095.

Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D., Steduto, P., Mueller, A., Komor, P., Tol, R., Yumkella, K. K. (2011). Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. Energy Policy, 39(12), 7896–7906.

Borgomeo, E., Jägerskog, A., Talbi, A., Wijnen, M., Hejazi, M., Miralles-Wilhelm, F. (2018). The water-energy-food Nexus in the Middle East and North Africa. World Bank: Washington, DC, USA.

Gupta, S., Chowdhury, S., Govindaraj, R., Amesho, K. T., Shangdiar, S., Kadhila, T., Iikela, S. (2025). Smart Agriculture Using IoT for Automated Irrigation, Water and Energy Efficiency. Smart Agricultural Technology, 101081.

Farmandeh, E., Choobchian, S., Karami, S. (2025). Decoding the water-energy-food nexus: validating indicators amidst climate change and agro-societal shifts. Discover Sustainability, 6:522.

Javan, K., Altaee, A., Darestani, M., Mirabi, M., Azadmanesh, F., Zhou, J. L., Hosseini, H. (2023). Assessing the Water–Energy–Food Nexus and Resource Sustainability in the Ardabil Plain: A System Dynamics and HWA Approach. Water, 15(20), 3673

Kheirinejad, S., Bozorg-Haddad, O., Savic, D., Singh, V. P., Loáiciga, H. A. (2024). Developing a National-Scale Hybrid System Dynamics, Agent-Based, Model to Evaluate the Effects of Dietary Changes on the Water, Food, and Energy Nexus. Water Resources Management, 38, 3581–3606.

Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis?. Journal of environmental studies and sciences, 4(4), 315-328.

Mooren, C. E., Munaretto, S., La Jeunesse, I., Sievers, E., Hegger, D. L. T., Driessen, P. P. J., ..., Madrigal, J. G. (2025). Water–energy–food–ecosystem nexus: how to frame and how to govern. Sustainability Science, 1-22.

Nasrollahi, H., Shirazizadeh, R., Shirmohammadi, R., Pourali, O., Amidpour, M. (2021). Unraveling the Water-Energy-Food-Environment Nexus for Climate Change Adaptation in Iran: Urmia Lake Basin Case-Study. Water, 13(9):1282.

Norouzi, N., Kalantari, G. (2020). The food-water-energy nexus governance model: A case study for Iran. Water-Energy Nexus, 3, 72-80.

Parra-López, C., Abdallah, S. B., Garcia-Garcia, G., Hassoun, A., Trollman, H., Jagtap, S., ..., Carmona-Torres, C. (2025). Digital technologies for water use and management in agriculture: Recent applications and future outlook. Agricultural Water Management, 309, 109347.

Radmehr, R., Brorsen, B. W., Shayanmehr, S. (2024). Adapting to climate change in arid agricultural systems: An optimization model for water–energy–food nexus sustainability. Agricultural Water Management, 303, 109052.

Rasul, G. (2016). Managing the food, water, and energy nexus for achieving sustainable development goals in South Asia. Environmental Development, 18, 14–25.

Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoing, H. K., Landerer, F. W., Lo, M. H. (2018). Emerging trends in global freshwater availability. Nature, 557(7707), 651-659.

Samadi-Foroushani, M., Keyhanpour, M. J., Musavi-Jahromi, S. H., Ebrahimi, H. (2022). Integrated water resources management based on water governance and water-food-energy nexus through system dynamics and social network analyzing approaches. Water Resources Management, 36(15), 6093-6113.

Zarei, S., Bozorg-Haddad, O., Kheirinejad, S., Loáiciga, H. A. (2020). Environmental sustainability: a review of the water–energy–food nexus. Environmental sustainability: A review of the water–energy–food nexus. AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society, 70(2), 138-154.

The role of Water-Soil-Food-Energy Nexus

Fatemeh Razzaghi
Water Engineering Department and Drought Research center, School of Agriculture, Shiraz University, Iran

Abstract
The increasing pressure on the limited resources of water, soil, food, and energy, along with the consequences of climate change, has highlighted more than ever the importance of integrated management approaches. The interconnectedness of these resources within the Water–Soil–Food–Energy nexus demonstrates that decisions made in one sector have direct implications for the others, thereby underscoring the pivotal role of management in ensuring the efficient coordination of these interactions. The adoption of harmonized policies, system-based modeling tools, clean and green technologies, and strengthened institutional structures are among the measures that can enhance resource efficiency and reduce environmental pressures. In this article, global experiences are reviewed and the specific conditions of Iran are analyzed within the nexus framework, showing that targeted and coordinated management is a key factor in improving the resilience of production systems, enhancing food and energy security, and achieving sustainable development. A review of national studies further indicates that management approaches grounded in nexus analysis can improve decision-making under conditions of water scarcity, energy stress, and soil degradation, and can guide development pathways in vulnerable regions.

Keywords: Resilience, Sustainable development, Clean Technology, Green Technology, Nexus